

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра виробництва приладів**

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Шевченко В.В.

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

на тему: «Контроль процесу обробки деталей приладів

в умовах автоматизованого виробництва»

Виконав:

студент VI курсу, групи ПБ-61м

Коробцов Є.І.

Керівник:

доцент кафедри виробництва приладів, к.т.н., доцент

Литвин О.В.

Консультант з розділу стартап-проекту:

доцент кафедри менеджменту, к.е.н., доцент

Бояринова К.О.

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2018

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет Приладобудівний
(повна назва)

Кафедра Виробництва приладів
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології ____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

в.о. завідувача кафедри

Шевченко В.В.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студента**

Коробцова Євгенія Івановича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Контроль процесу обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва»,

науковий керівник дисертації Литвин Олександр Валеріанович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «23» березня 2018 р. № 1006-с

2. Термін подання студентом дисертації 10 травня 2018 р.

3. Об'єкт дослідження - процес обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва.

4. Предмет дослідження. Контроль процесу обробки деталей приладів на основі потужності різання та змінної складової ЕРС різання.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити. Провести аналіз методів та засобів контролю процесу обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва; на основі досліджень процесу різання встановити взаємозв'язок потужності різання та змінної складової ЕРС різання зі зношенням різального інструменту; шляхом експериментальних досліджень встановити характер залежності змінної складової ЕРС із шорсткістю поверхні; розробити комплексну математичну модель зношення різального інструменту на основі змінної складової ЕРС різання та потужності; провести математичне моделювання за допомогою розробки програмного забезпечення; розробити двохпараметричну систему контролю обробки деталей приладів на верстатах з ЧПК в умовах автоматизованого виробництва; розробити стартап-проект.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу. Аналіз методів та засобів процесу контролю обробки деталей в умовах автоматизованого виробництва. Теоретичні дослідження взаємозв'язку потужності різання та змінної складової ЕРС зі зношенням та поломкою інструменту. Основні причини виникнення змінної складової ЕРС різання. Взаємозв'язок процесу різання деталей приладів з потужністю різання. Розробка та аналіз математичної моделі зношення різального інструменту на основі потужності та змінної складової ЕРС різання. Розробка двохпараметричної системи контролю процесу обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва. Розробка функціональної схеми двохпараметричної системи контролю. Розробка алгоритму та принцип роботи контролю процесом обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва. Розробка програмного забезпечення контролю процесу обробки деталей на основі двох параметрів. Експериментальні дослідження системи контролю процесу обробки деталей в умовах автоматизованого виробництва. Методика проведення експериментальних досліджень. Залежність величини зношення різального інструменту від змінної складової ЕРС різання та потужності. Розробка стартап-проекту «Контроль процесу обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва».

7. Орієнтовний перелік публікацій. Статті та тези доповідей за темою магістерської дисертації (надано в Додатку А у вигляді Форми 2б).

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту	Бояринова К.О., к.е.н., доцент		

9. Дата видачі завдання 16.03.2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз методів та засобів контролю процесу обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва.	23.03.2018 р.	
2	Розробка математичної моделі зношення різального інструменту на основі потужності та змінної складової ЕРС різання.	30.03.2018 р	
3	Створення структурної схеми та алгоритму роботи системи адаптивного керування.	05.04.2018 р.	
4	Розробка двохпараметричної системи контролю процесом обробки деталей.	25.04.2018 р.	
5	Створення стартап-проекту.	10.05.2018 р.	

Студент

_____ Є.І. Коробцов
(підпис) (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ О.В. Литвин
(підпис) (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська атестаційна робота на тему: «Контроль процесу обробки деталей приладів в умовах автоматизованого» складається із 110 аркушів. До неї входять: 35 рисунків, 20 таблиць, 3 додатки. В роботі використано 56 бібліографічних найменувань.

Завдання даної роботи є розробка системи контролю процесу обробки деталей в умовах автоматизованого виробництва.

Проаналізовано засоби та методи процесу контролю обробки деталей в умовах автоматизованого виробництва, розглянуто види зношення різального інструменту. Теоретично досліджено зв'язок потужності різання та змінної складової ЕРС різання зі зношенням та поломкою інструменту. На основі досліджень вирішено створити двохпараметричну систему контролю процесу обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва, яка базується на вимірюванні потужності та змінної складової ЕРС різання. Щоб реалізувати систему створено комплексну математичну модель та функціональну схему роботи системи, побудовано алгоритм роботи даної системи. Розроблено програмне забезпечення на основі двох параметрів. Представлено методику проведення експериментальних досліджень залежності величини зношення різального інструменту від змінної складової ЕРС та потужності різання.

Результатами даної роботи можна користуватися державним підприємствам для забезпечення необхідної якості та точності поверхні обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва контролюючи процес різання в режимі реального часу.

Ключові слова: КОНТРОЛЬ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ; ПОТУЖНІСТЬ РІЗАННЯ; ЗМІННА СКЛАДОВА ЕРС РІЗАННЯ; ДВОХПАРАМЕТРИЧНА СИСТЕМА.

THE ABSTRACT

Master's attestation work on the topic: "Monitoring the processing of parts of devices in an automated environment" consists of 110 pages. It includes 35 drawings, 20 tables, 3 attachments. The 56 bibliographic titles were used in this work.

The main task of this work is the develop of a control system for the process of processing parts in the conditions of automated production.

The means and methods of the control of the machining of parts in the conditions of automated production were analyzed, and the types of wear of the cutting tool are considered. The relationship between the cutting power and the variable component of the EMF cutting with the wear and breakage of the tool was theoretically investigated. On the basis of the research it was decided to create a two-parameter control system for the processing of parts of devices in the conditions of automated production, based on measuring the power and the variable component of the EMF cutting. To implement the system, a complex mathematical model and a functional scheme of the system's operation have been created, an algorithm for the work of this system has been constructed. The software is developed on the basis of two parameters. The technique of carrying out of experimental researches of dependence of size of deterioration of the cutting tool on a variable component EMF and cutting power is presented.

The results of this work can be used by state enterprises to ensure the necessary quality and accuracy of the surface of machining of parts of devices in the conditions of automated production by controlling the cutting process in real time.

Key words: CUTTING PROCESS CONTROL; CUTTING POWER; VARIABLE COMPONENT OF CUTTING EFFECT; TWO-PARAMETER SYSTEM.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	5
THE ABSTRACT	6
ВСТУП	8
I. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	12
1.1 Аналіз видів зношення різального інструменту	12
1.2 Аналіз методів та засобів контролю зношення різального інструменту	24
Висновки до розділу	31
II. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ПОТУЖНОСТІ РІЗАННЯ ТА ЗМІННОЇ СКЛАДОВОЇ ЕРС ІЗ ЗНОШЕННЯМ ТА ПОЛОМКОЮ ІНСТРУМЕНТУ	33
2.1. Фізичні основи процесу обробки деталей приладів.....	33
2.2. Основні причини виникнення змінної складової ЕРС різання	34
2.3. Взаємозв'язок змінної складової ЕРС різання зі зношенням різального інструменту.....	41
2.4 Взаємозв'язок процесу різання деталей приладів з потужністю різання	45
2.5. Вплив матеріалу інструменту та деталі на змінну складову ЕРС різання	47
2.6. Взаємозв'язок ЕРС із параметрами шорсткості	54
2.7. Розробка і аналіз математичної моделі зношення різального інструменту на основі потужності та змінної складової ЕРС різання.....	57
Висновки до розділу	63
III. РОЗРОБКА ДВОХПАРАМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИЛАДІВ В УМОВАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	65
3.1. Розробка функціональної схеми двохпараметричної системи контролю	65

3.2 Розробка алгоритму та принцип роботи контролю процесом обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва.....	67
3.3 Розробка програмного забезпечення контролю процесу обробки деталей на основі двох параметрів	69
Висновки до розділу	70
IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА	72
4.1 Методика проведення експериментальних досліджень	72
4.2. Залежність величини зношення різального інструменту від змінної складової ЕРС різання та потужності	82
Висновки до розділу	83
V. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «КОНТРОЛЬ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИЛАДІВ В УМОВАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА»	85
5.1 Опис ідеї проекту	85
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	87
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	88
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	96
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	98
Висновки до розділу	102
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	104
Література	105
ДОДАТКИ	111
ДОДАТОК А.....	112
ДОДАТОК Б	113
ДОДАТОК В.....	124

ВСТУП

Автоматизоване виробництво деталей приладів, в найпростішому вигляді зародилося вже при появі перших машин та вже в наш час стає основним методом здійснення виробництва будь-якої деталі.

В областях промисловості, що виготовляють масовий продукт при безперервному процесі виробництва, розвиток автоматизації йшов з випередженням і більш широким фронтом застосування, в порівнянні з іншими галузями промисловості. Це природній наслідок значно більшої складності автоматизації виробництва подібних виробів. Тому, у приладобудуванні спостерігається збільшення об'єму та темпу виробництва, яке, в свою чергу, висуває дуже високі вимоги до засобів контролю устаткування, усунення несправностей та створення систем керування, які будуть автоматично визначати наступну дію керування процесом обробки, аналізуючи об'єкт при поточному керуванні, тобто створення адаптивних систем керування [1].

В даний час існує безліч видів автоматизованого виробництва, які випускають різнохарактерну приладобудівну продукцію з різним масштабом виробництва, різною універсальністю та комплексністю – від обробки одного певного виду заготовок тільки одним певним інструментом до комплексних автоматизованих цехів або заводів, налаштованих на випуск таких складних виробів, як вали, шестерні, поршні, підшипники та інші, які мають відповідати певній високій якості поверхні та мати велику «гамму» типорозмірів.

Сьогоднішній розвиток виробництва неможливий без його автоматизації, яка дає шляхи розвитку для підвищення продуктивності і полегшення умов праці людини. Автоматизація виробничих процесів є основним напрямком технічного прогресу. Сучасне приладобудівне виробництво представляє собою складний комплекс, який повинен забезпечувати безперебійне функціонування всіх елементів виробничого процесу. Тому своєчасний контроль процесу обробки деталей приладів, а зокрема стану зношення різального інструменту є просто необхідними діями в умовах автоматизованого виробництва.

Основний обсяг обробки виконується в механічних цехах, де заготовки, проходячи механічну обробку, набувають необхідну конфігурацію, точність і чистоту. На початкових етапах основним напрямком автоматизації в приладобудуванні була автоматизація технологічних процесів механічної обробки: створення токарних, шліфувальних, фрезерних верстатів в автоматизованих лініях. Такий напрям в кінцевому підсумку призводить до створення автоматизованих ділянок і цехів, що дозволяє значно скоротити кількість виробничих робітників, безпосередньо зайнятих обслуговуванням верстатів. Автоматизація верстатів дозволяє підвищити їх продуктивність за рахунок скорочення часу холостого ходу. Лише за завантаження і вивантаження деталей час холостого ходу в ряді випадків становить 40% від загального часу, потрібного на обробку деталі. Тобто автоматизація виробничого процесу дає змогу підприємцям дуже добре економити та збільшити виробництво в цілому, але головним недоліком є те, що машину важко навчити контролювати процес обробки деталей, або ж діяти в непередбачуваних ситуаціях. Тому своєчасний контроль виробничого процесу у режимі реального часу є просто необхідними діями в умовах автоматизованого виробництва.

На сьогоднішній день існує дуже багато методів контролю процесу обробки деталей в умовах автоматизованого виробництва. Багато з них важко реалізувати, інші – є досить застарілими, частина з них потребує вдосконалення, адже вони є повільними та не досить надійними. Щоб вдосконалити засоби потрібно вивчити фізику процесу різання для встановлення взаємозв'язку явищ, які виникають в процесі різання із станом різального інструменту.

Вдосконалення засобів потребує подальшого вивчення фізики процесу різання для встановлення взаємозв'язку явищ, що виникають при різанні зі станом різального інструменту.

Об'єктом дослідження є процес обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва.

Предметом дослідження є контроль процесу обробки деталей приладів на основі потужності різання та змінної складової ЕРС різання.

Метою магістерської дисертації є розробка двохпараметричної системи контролю процесом обробки деталей приладів на верстатах з ЧПК, що дозволить підвищити надійність і точність процесу обробки та якість поверхні деталі в умовах автоматизованого виробництва при використанні гнучких виробничих систем на основі змінної складової електрорушійної сили різання та потужності різання.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні завдання:

- провести аналіз методів та засобів контролю процесу обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва;
- на основі досліджень фізики процесу різання встановити взаємозв'язок потужності різання та змінної складової ЕРС різання зі зношенням різального інструменту;
- шляхом експериментальних досліджень встановити характер залежності змінної складової ЕРС із шорсткістю поверхні;
- розробити комплексну математичну модель зношення різального інструменту на основі змінної складової ЕРС різання та потужності різання в умовах автоматизованого виробництва;
- розробити систему контролю обробки деталей приладів на верстатах з ЧПК в умовах автоматизованого виробництва.

На основі дослідження на фізичному рівні процесу різання матеріалів встановлено, що виникаючі при різанні електричні сигнали слугують джерелом інформації про зношення різального інструменту.

При виконанні роботи застосовані теоретичні і експериментальні методи досліджень, при цьому використані основні положення теорії різання, тертя і зношення, пластичної деформації, методи визначення точності обробки, а також математичні методи обробки результатів вимірювання.

Наукова новизна

У магістерській дисертації отримані наступні результати, які володіють науковою новизною:

- на основі дослідження фізики процесу різання матеріалів встановлено, що змінна складова ЕРС, яка виникає при різанні, слугує джерелом інформації про зношення різального інструменту;
- розроблена комплексна математична модель зношення різального інструменту на основі змінної складової ЕРС різання та потужності різання;
- розроблена комплексна система контролю процесу різання на основі вимірювання змінної складової ЕРС та потужності різання.

Результати роботи можуть бути використані у наукових дослідженнях схожої тематики. Вдосконалена система контролю в процесі обробки може використовуватись на приладобудівних промислових підприємствах.

I. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА

Контроль процесу обробки деталей в умовах автоматизованого виробництва передбачає реєстрацію критичного зношення різального інструменту і його поломку, а також визначення моментів початку і кінця різання. Для чистових операцій основною функцією засобів контролю буде реєстрація критичного зношення різального інструменту. Тому, перш ніж розпочати аналіз існуючих методів і засобів контролю обробки деталей в умовах автоматизованого виробництва розглянемо фізичні основи теорії тертя і зношення інструменту.

Процес зношення різального інструменту не можна розглядати ізольовано від процесу тертя, а встановлення загальних закономірностей процесів тертя і зношення контактуючої пари "інструмент-деталь" дозволить розкрити фізичну основу взаємозв'язку явищ, супроводжуваних процесом різання, із зношенням інструменту і тим самим на науковій основі створювати засоби контролю працездатності різального інструменту.

Враховуючи, що процес різання протікає при високих значеннях відносної деформації, при цьому деформації локалізовані в малому об'ємі пластичної зони і швидкість деформації висока, а також, потрібно відмітити, що свіжооброблена поверхня деформованого металу хімічно чиста, проблема зношення інструменту повинна вирішуватися на базі теорій тертя матеріалів, пластичної деформації, електронної техніки, електромагнітної динаміки, радіаційної фізики, закономірностей адгезійного, абразивного, дифузійного і окислювального видів зношення.

1.1 Аналіз видів зношення різального інструменту

Зношення інструменту впливає на сили різання (тертя на задній поверхні збільшується), температуру різання, параметри шорсткості обробленої

поверхні, точність оброблення, вібрації [44]. Тому необхідно встановити критерії, за допомогою яких можливо визначити час, після якого різець необхідно переточити. Існує декілька критеріїв зношення різців.

Критерій блискучої смужки. Різець вважається зношеним і його необхідно переточити, коли при обробці сталі на поверхні різання з'являється блискуча смужка (рис. 1.1.1), а при обробці чавуну – темні плями. В даний момент окремі точки різальної кромки вже починають кришитись, тому саме в цих місцях різець зминає поверхню різання і, неначе, полірує її. Поява блискучої смужки відповідає початку третього періоду зношення.

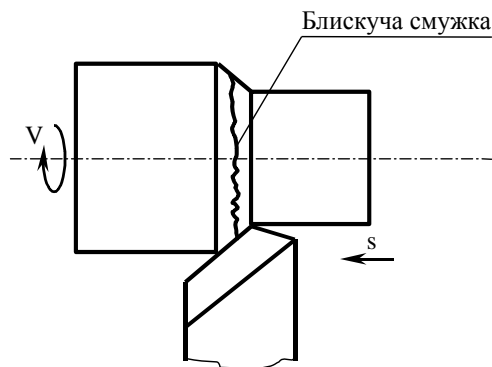


Рисунок 1.1.1. Блискуча смужка на поверхні різання.

При роботі твердосплавних різців плями і смужку помітити доволі важко.

Силовий критерій. Різець вважається затупленим, коли починається різке збільшення сил, особливо P_y і P_x . Недоліком цього методу є необхідність встановити на верстат спеціальні прилади для вимірювання цих сил.

Критерій оптимального зношення. Оптимальним зношенням вважається таке зношення, при якому загальний термін служби інструменту виходить найбільшим. Загальний термін служби інструменту M визначається як здобуток кількості переточувань k , які дозволяє розмір пластини, при даній величині зношення, на час роботи T , за який це зношення інструменту створиться, тобто

$$M = k \cdot T \quad (1.1.1)$$

Кількість переточувань, яку дозволяє розмір пластини, при її зношенні по передній поверхні (рис. 1.1.2, а):

$$K_1 = \frac{\frac{2}{3}C}{h_{\text{л}} + \Delta}, \quad (1.1.2)$$

де C – товщина пластини, мм; $h_{\text{л}}$ – глибина лунки, мм; Δ – допуск на заточування ($\Delta=0.1-0.2$ мм).

Кількість переточувань, яку допускає розмір пластини при зношенні по задній поверхні (рис. 1.1.2, б), визначається через зношення в напрямку передньої поверхні P :

$$p = \frac{a}{\cos \gamma} \quad (1.1.3)$$

де $a = h_3 \cdot t \cdot g \cdot a$, тоді

$$p = \frac{h_3 \cdot t \cdot g \cdot a}{\cos \gamma} \quad (1.1.4)$$

Звідси слідує, що кількість переточувань, які дозволяє розмір пластини при її зношенні по передній поверхні потрібно вираховувати наступною формулою:

$$K_2 = \frac{\frac{2}{3}B}{\frac{h_3 \cdot t \cdot g \cdot a}{\cos \gamma} + \Delta}, \quad (1.1.5)$$

де B – довжина пластини, мм.

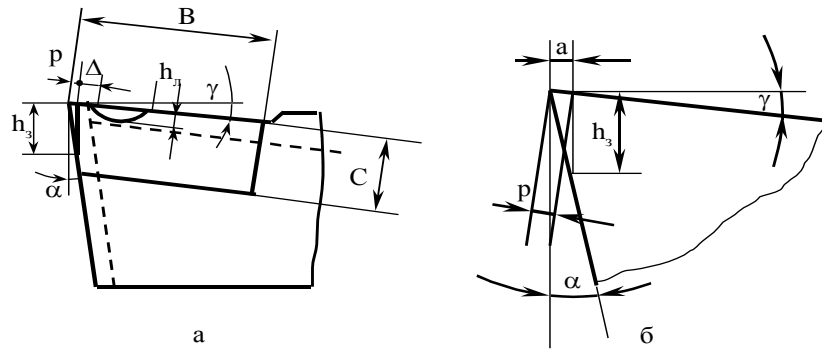


Рисунок 1.1.2. Розрахункові схеми для визначення кількості переточувань.

а – при зношенні по передній поверхні, *б* – при зношенні по задній поверхні.

Залежність загального терміну роботи різця від величини допустимого зношення по задній поверхні має наступний вигляд (рис. 1.1.3).

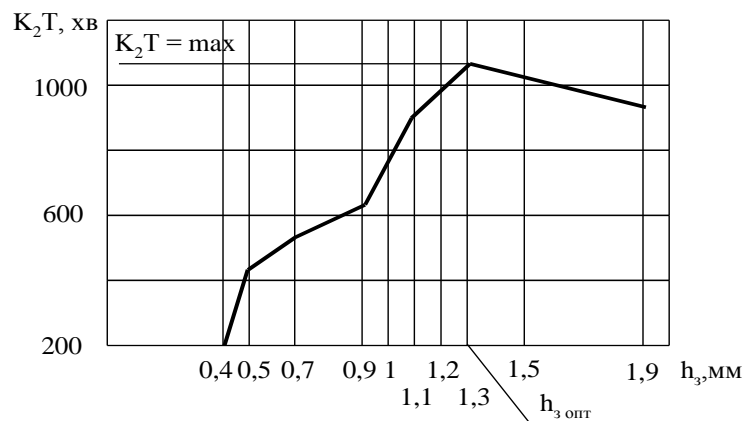


Рисунок 1.1.3. Вплив величини зношення на загальний термін роботи інструменту.

Критерій оптимального зношення використовується в дослідницьких роботах по визначенню різальних властивостей інструменту, який призначений для чорнових і напівчистових робіт. Цей критерій може використовуватися і у виробничих умовах для інструменту, який призначений для оброблення деталей масового виробництва, а також інструменту дорогого і складного у виготовленні.

До недоліків цього критерію відноситься необхідність доведення різця при дослідженнях до значного зношення.

Технологічний критерій. Цей критерій використовують до інструменту, який призначений для чистового оброблення. Його сутність полягає в тому, що інструмент вважається зношеним, коли оброблена поверхня перестає відповідати технічним умовам (рис. 1.1.4).

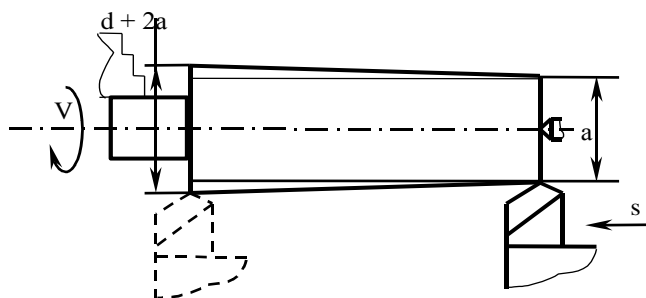


Рисунок 1.1.4. Схема, яка пояснює сутність технологічного критерію.

Із розглянутих критеріїв найбільше розповсюдження здобули критерій оптимального зношення і технологічний критерій.

Для токарних прохідних і підрізних різців з пластинками із твердих сплавів рекомендуються в якості критеріїв наступні величини зношення по задній поверхні [14]:

а) при чорновій обробці сталей $h_z = 1.0 - 1.4$ мм,
при чистовій – 0.4 – 0.6 мм;

б) при чорновій обробці чавуна $h_z = 0.8 - 1.0$ мм,
при чистовій – 0.6 – 0.8 мм;

в) для відрізних різців $h_z = 0.8 - 1.0$ мм.

Для оцінювання якості різального інструменту використовуються і інші критерії: величина відносного зношення (відношення величини зношення по задній поверхні або радіального зношення до довжини шляху різання або до площі обробленої поверхні); величина інтенсивності зношення, яка виражена в мм³ або мг зношеної маси інструменту за 1 метр шляху різання або на 1 см² обробленої поверхні [4].

Різальний інструмент в процесі різання впливає на оброблюваний матеріал і викликає утворення стружки та формування нової поверхні, однак

сам при цьому піддається впливу з боку оброблюваного матеріалу та інтенсивно зношується. Різальні інструменти працюють у надзвичайно важких умовах, при дії величезних тисків на поверхнях контакту і високої температури, в умовах тертя чистих, новостворених поверхонь. З цих причин інтенсивність зношення різальних інструментів в тисячі і десятки тисяч разів перевершує інтенсивність зношення тертьових деталей машин [5].

Характер зношення різального інструменту, тобто розподіл його по робочим поверхням інструменту, залежить від багатьох конкретних умов, в яких відбувається різання. Зношення різального інструменту виражається в появі лунки на передній поверхні, площадок зношення на головній і допоміжній задніх поверхнях і в зменшенні вершини різця або різального леза.

Дивлячись які режими різання було задано, який матеріал використовується для обробки, на скільки хороші умови охолодження, та ще багато факторів впливають на стирання площадок контакту, розрізняють три види (рис.1.1.5).

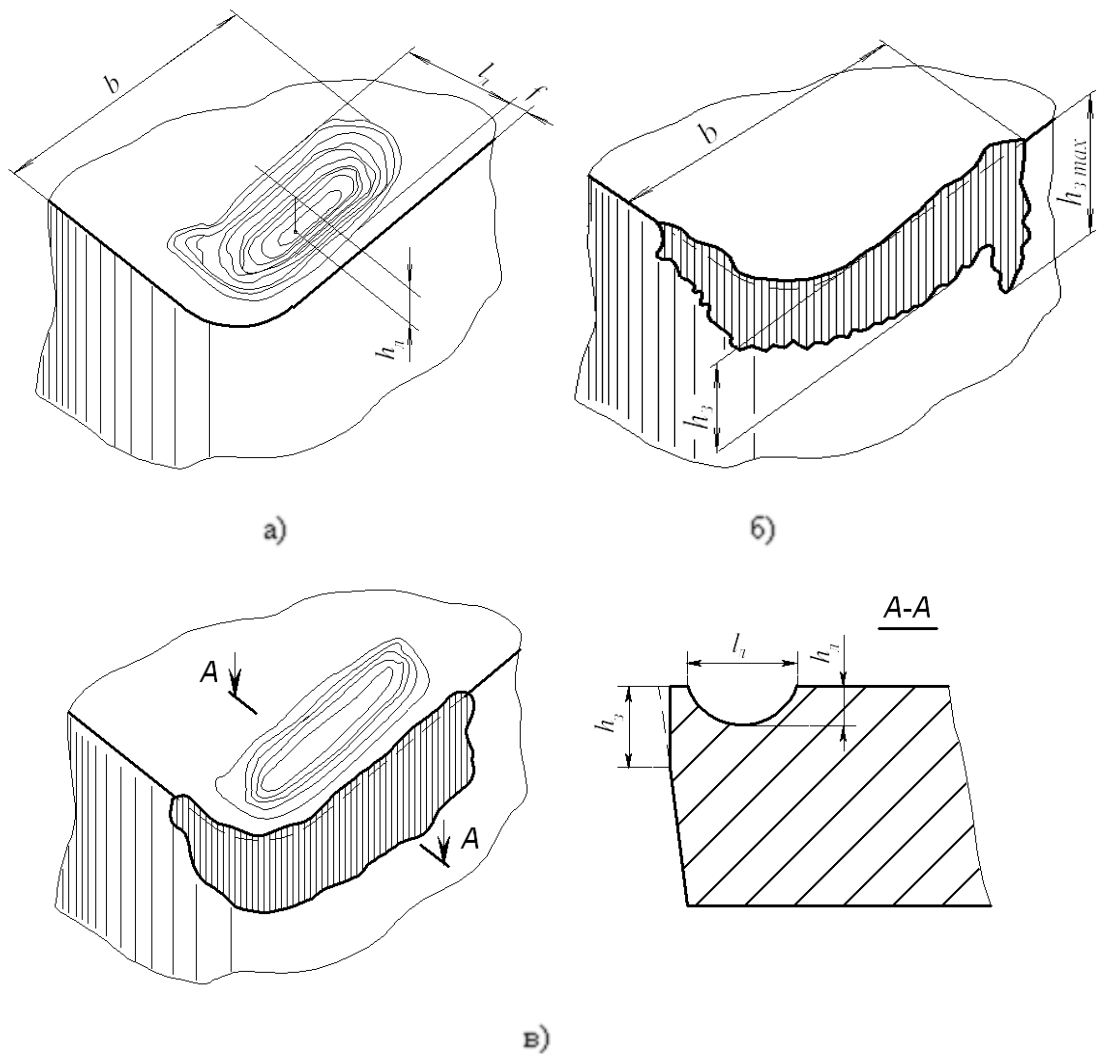


Рисунок 1.1.5. Види зношення інструменту по поверхнях: а - зношення по передній поверхні; б - зношення по задній поверхні; в – зношення по передній та задній поверхнях.

Різальний інструмент зношується по задній поверхні в основному при обробці крихких матеріалів, адже при різанні цих матеріалів утворюється так звана стружка надлому, яка не є міцною та суцільною. Також зношення по задній поверхні переважаючим при різанні з малою товщиною зрізу або ж у випадках, коли значення задніх кутів є малими.

Зношення передньої поверхні відбувається, як правило, на деякій відстані від головної різальної кромки. Лунка, яка утворюється з часом роботи різця поглиблюється і незначно розширюється в бік від різальної кромки.

Зношення різального інструменту тільки по передній поверхні відбувається у випадку обробки в'язких металів з великими перетинами зрізу,

коли утворюється стійкий наріст, що виключає контакт задньої поверхні з оброблюваним матеріалом. У більшості ж випадків, на практиці різання металів, інструмент зношується як по передній, так і по двом заднім поверхнях (рис. 1.1.2 а, б).

Зношення інструменту повністю характеризується зазначеними нижче параметрами (рис. 1.1.6, 1.1.7).

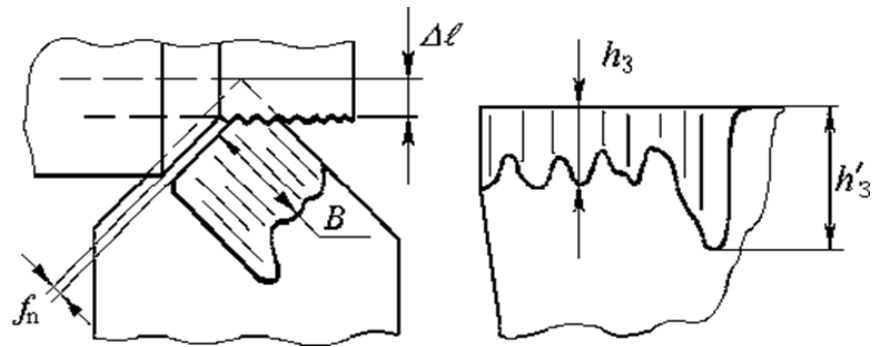


Рисунок 1.1.6. Параметри зношення інструменту.

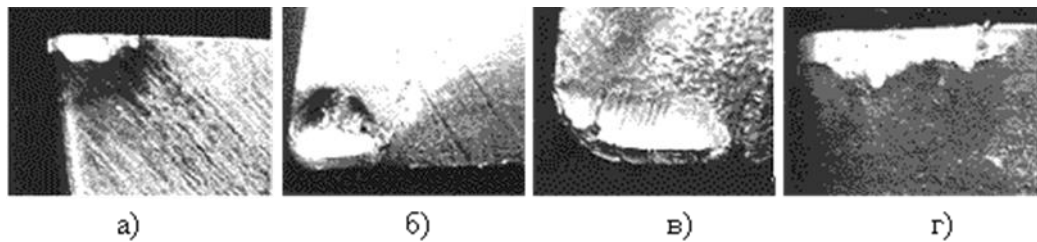


Рисунок 1.1.7. Зношення різців з швидкорізальної сталі P18 при точінні сталі 40Х: а - по задній поверхні, б – по передній поверхні; твердого сплаву ВК8 при точінні корозійностійкою сталлю: в - по задній поверхні, г – по передній поверхні.

Ширина фаски на задній поверхні h_3 , виключаючи період початкового зношення, зростає пропорційно часу різання. Ширина лунки B змінюється мало, а ширина полки f_n на передній поверхні зменшується. Встановлено, що працездатність різального інструменту значною мірою визначається наявністю полки на його передній поверхні.

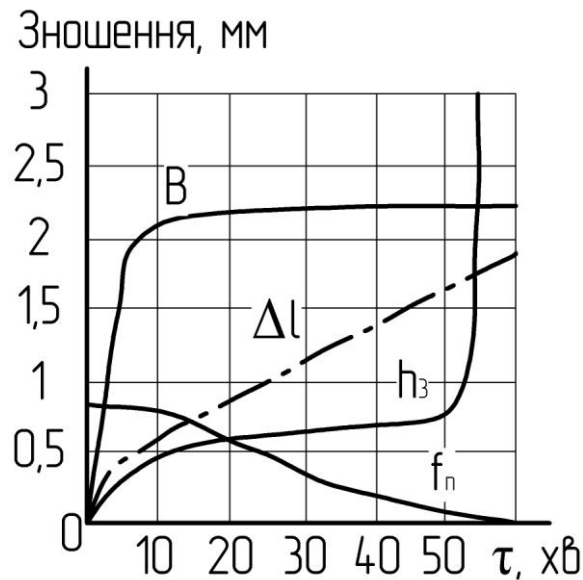


Рисунок 1.1.8. Характерні залежності зношення різального інструменту від часу різання. Глибина різання - 1,5 мм, швидкість різання - 35 м/хв, подача - 0,25 мм/об.

Руйнування полки призводить до втрати різальної здатності інструменту і його катастрофічного руйнування - посадці. На рис. 1.1.8 показані найбільш характерні залежності величини зношення різця з швидкорізальної сталі від часу різання при точінні сталі 40Х.

Молекулярно-термічні процеси, які генеруються в зоні різання на поверхнях контакту “інструмент-деталь” і механічний вплив оброблюваного матеріалу значною мірою впливають на зношення робочих поверхонь різального інструменту. У процесі різання можуть виникати різні види зношення, такі як абразивне, адгезійне, електроерозійне, хімічне та інші. Тільки конкретні умови можуть визначити який з цих видів буде домінуючим, тобто визначати інтенсивність зношення та, безпосередньо, стійкість самого різального інструменту.

Абразивне зношення

Даний вид зношення відбувається по причині дряпання поверхонь інструменту твердими включеннями оброблюваного матеріалу. Тверді включення при цьому виступають як мікрорізці, які шкребуть поверхню інструменту (рис. 1.1.9).

Абразивне зношення при різанні, коли використовується твердий сплав відбувається таким чином, що м'які кобальтові зв'язки “вишкрібаються”, а тверді зерна карбіду “вириваються”. Тобто деякі частинки матеріалу інструменту, зокрема наросту, який зазвичай руйнується через деякий проміжок часу, а також є твердим, як матеріал інструменту, проходять по контактним поверхням, забираючи не велику частину матеріалу інструменту і залишаючи сліди, які представляють собою подряпини [9].

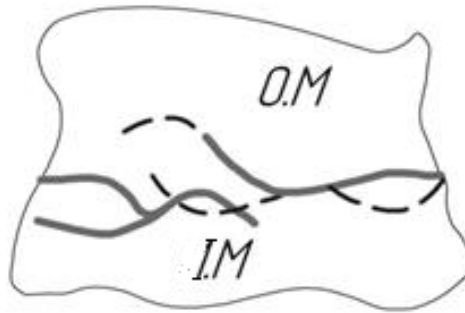


Рисунок 1.1.9. Абразивне зношення.

При різанні в хімічно-активних середовищах можливе абразивно-хімічне зношення (рис. 1.1.10) в результаті інтенсивного утворення, зішкрібання і виносу м'яких плівок з'єднань елементів середовища з матеріалом інструменту.

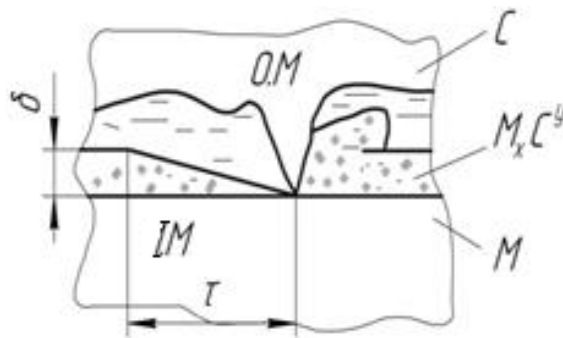


Рисунок 1.1.10. Абразивно-хімічне зношення:

IM - інструментальний матеріал, C - середовище, $M_x C_y$ - плівка хімічної сполуки товщиною δ , τ - час відновлення плівки до товщини δ .

Адгезійне зношення

Вид зношення, при якому найдрібніші частинки матеріалу інструменту відриваються силами адгезії, через те, що, при різанні на поверхні контакту “інструмент-деталь” діють дуже великі тиски і в зоні контакту утворюються так

звані ювенільні поверхні, які є збудником інтенсивної адгезії матеріалів, які контактують. При зближенні їх на відстань приблизно 100 ангстрем проявляються сили молекулярної взаємодії і утворюється так зване «холодне зварювання». Такий вид зношення також може бути при твердості, яка є меншою твердості оброблюваного матеріалу. В такому випадку наклеп може викликати деякі ускладнення при переміщенні стружки, можливо додаткове деформування стружки, а також локальне підвищення температури в зоні різання, яка в більшості випадків призводить до зменшення сил металевого зв'язку матеріалу інструменту (рис. 1.1.11).

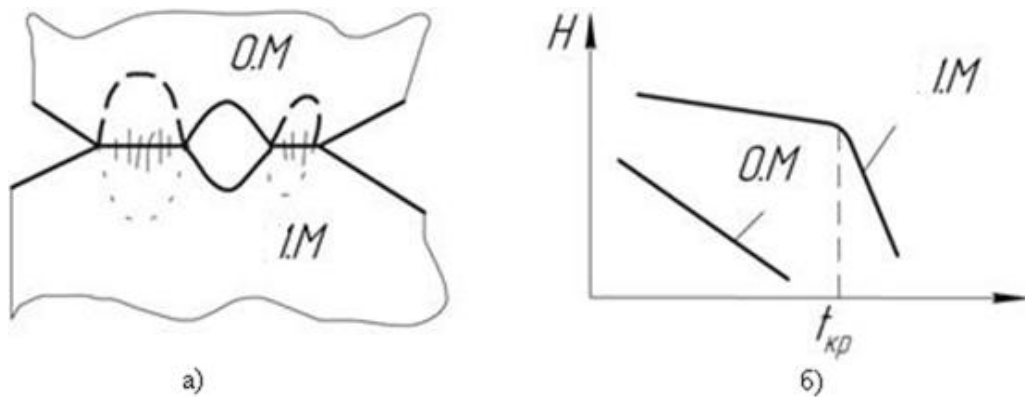


Рисунок 1.1.11. Адгезійне зношення:

а – «холодне зварювання», б - залежність твердості оброблюваного (О.М) та інструментального (І.М) матеріалів від температури, $t_{кр}$ - температура червоностійкості інструментального матеріалу.

Наближено закономірність адгезійного зношення виражається залежністю:

$$v \cdot T = L = \left(\frac{H_{I.M.}}{H_{O.M.}} \right)^Z \quad (1.1.6)$$

де $H_{I.M.}$ - твердість інструментального матеріалу; $H_{O.M.}$ - твердість оброблюваного матеріалу; L – шлях пройдений інструментом до повного затуплення протягом всього періоду стійкості.

Електроерозійне зношення

Цей вид зношення відбувається в результаті дії електричного струму, що утворюється під впливом електрорушійної сили (ЕРС). У зв'язку з тим, що інструмент і оброблюваний матеріал контактують в окремих точках з різною температурою, в кожній точці діє ЕРС різної величини. В результаті, в зоні різання утворюється складна система електричних ланцюгів (контурів), при розриві яких відбувається перенесення краплі одного з матеріалів на поверхню іншого в залежності від знаку заряду поверхні. При перенесенні краплі оброблюваного матеріалу на поверхню інструменту вона приварюється до поверхні інструменту і утворює поріг, який згодом виламується з інструментального матеріалу. Крім того, затверділа крапля, що проходить між оброблюваним матеріалом і інструментом, дряпає поверхню останнього і посилює абразивне зношення. Такий механізм зношення значно посилює зношення твердосплавних інструментів, що працюють при великих швидкостях різання, в зоні різання яких розвиваються ЕРС до декількох десятків мВ, а температура знаходиться в межах 1000 °С [11]. Тверда частка в цьому випадку легко вишкрібає розм'якшену і видавлений на поверхню кобальтовий зв'язок, недолік якого послаблює з'єднання твердих карбідних зерен твердого сплаву. Викришування їх приводить до лавиноподібного розвитку зношення інструменту.

Хімічне зношення

Цей вид зношення є результатом впливу високих температур і тиску, також цей процес потребує доступу повітря. Зазвичай він відбувається там, де різальна кромка тільки починає контактувати з зовнішньою частиною припуску, який знімається, а в цю зону повітря, як правило, має вільний доступ (рис. 1.1.12).

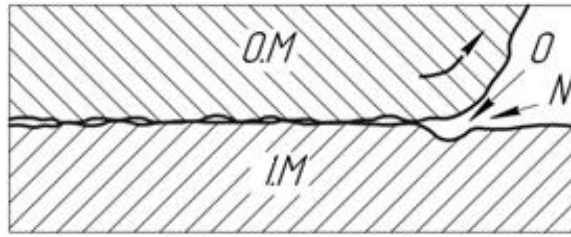


Рисунок 1.1.12. Хімічне зношення різальних інструментів.

Механізми зношення тісно пов'язані із швидкістю різання, але різні види зношення залежать від неї по-різному. На рис. 1.1.13 показані тенденції розвитку зношення пластин з твердого сплаву.

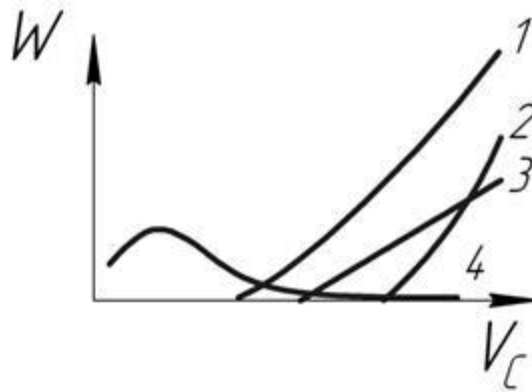


Рисунок 1.1.13. Залежність зношення твердосплавних пластин від швидкості різання: 1 - абразивне зношення, 2 – електроерозійне зношення, 3 - хімічне зношення, 4 - адгезійне зношення.

1.2 Аналіз методів та засобів контролю зношення різального інструменту

Надійність будь-яких технічних засобів, що працюють в автоматизованому або автоматичному режимі, є однією з основних властивостей, за якою оцінюється доцільність застосування цих засобів у виробництві. Надійність - властивість об'єкта зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання і транспортування. Надійність складається з поєднання властивостей: безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності і зберігання. Для кількісної характеристики надійності технологічного обладнання в даний час прийнято використовувати середнє

напрацювання на відмову (характеризує безвідмовність) - відношення тривалості роботи відновлюваного обладнання до математичного сподівання числа відмов протягом цього напрацювання, і коефіцієнт технічного використання (комплексний показник, що характеризує всі властивості надійності) - відношення математичного очікування інтервалів часу перебування в працездатному стані за деякий період експлуатації до суми математичних очікувань інтервалів часу перебування в працездатному стані, простоїв, обумовлених технічним обслуговуванням, і ремонтів за той же період експлуатації.

З метою підвищення працездатності автоматизованого обладнання, забезпечення заданої розмірної точності виготовлених виробів з досить низькою шорсткістю поверхні обробки передбачається введення пристрою діагностування та контролю процесу різання [43].

Останнім часом великого поширення набули системи діагностики основані на вимірювання потужності різання. Основою методу є те, що при зміні крутного моменту на валу двигуна унаслідок зміни стану різального інструменту змінюється його споживана потужність. Тому потужність, яка споживається з мережі електродвигунами може використовуватись як параметр, за допомогою якого можна дати оцінку зношення різального інструменту [37]. Цей метод вважається одним з найпростіших методів, які використовуються для контролю стану різального інструменту. Основними перевагами даного методу є простота, не велика вартість, хороша інформативність параметру та відсутність великої необхідності в зміні устаткування верстату. Використовуючи електронні пристрої можна здійснювати контроль інструменту на цілісність, вимірюючи потужність, яка розвивається електродвигуном [38].

Недоліком даної системи є те, що датчики, що стежать за величиною крутного моменту і потужністю, яка розвивається електродвигуном, недостатньо ефективні, так як зміна крутного моменту та потужності

відбувається недостатньо швидко. Незважаючи на це дана система діагностики має велику популярність за кордоном.

На даний час проводяться спроби створення комплексних діагностичних систем, які мають за основу не один метод діагностики, а комбінують декілька методів та мають можливість керування процесом обробки, виходячи з отриманих результатів діагностики. Такі системи є більш ефективними та мають великі перспективи на розвиток та впровадження у виробництво, а саме використання на верстатах з ЧПК [20].

Спосіб визначення зношення різального інструменту, який оснований на вимірюванні сил, які виникають при різанні наведено в [13]. Контроль різального інструменту та прогнозування зношення реалізується за допомогою пристрою, який має кілька приймачів вхідного сигналу, які уособлюють собою три тензометричні датчики, під'єднаних до входів обчислювача, функціонально забезпечуючи вимірювання сил різання по осях P_x, P_y, P_z . [21] Після того, як дані датчики отримали інформацію проводиться аналіз зношення інструменту, який є вже на даний момент, та прогнозується інтенсивність та величина зношення цього інструменту, якщо продовжувати обробку з такими ж самими режимами.

Вимірювання крутного моменту на деталі, що обертається, або інструменті за допомогою тензометричних датчиків дозволяє проводити контроль зношення інструменту [29]. Вимірювання електричних сигналів з тензометричного датчика здійснюють за допомогою струмознімальних кілець. Недоліком застосування струмознімальних кілець є вплив на точність вимірювання сигналу шумів, які обумовлені контактом даних кілець з щітками. Безконтактні методи вимірювання крутного моменту зважаючи на високу вартість не знаходять широкого застосування.

Широкого поширення набули методи контролю зношення інструменту, засновані на вимірюванні температури різання. Встановлено, що затуплення інструменту по задній поверхні від 0,004 до 0,4 мм приводить до збільшення

температури різання [33]. Отже, зношення інструменту робить вплив на температуру, особливо, при обробці з малими перетинами зрізу. Експериментально доведено, що збільшення температури лінійно пов'язано із збільшенням зношення, при цьому температура вимірювалася за допомогою штучної термопари. На основі теорії подібності одержано рівняння для оброблюваності, з якого витікає, що температура є основною характеристикою стійкості інструменту. Проте в зарубіжній літературі зустрічаються роботи, в яких висловлюються сумніви відносно можливості контролю зношення інструменту на підставі температури. Наголошується, що із збільшенням зношення інструменту температура змінюється несуттєво.

Метод контролю зношення різального інструменту на основі ЕРС дозволяє отримати інформацію із зони різання про стан різального інструмента безпосередньо шляхом вимірювання ЕРС різання, що генерується в зоні ковзаючого контакту різального інструменту з оброблюваною деталлю [13, 19].

На даний час проведено дуже багато дослідів на основі яких сформовані відношення зміни технологічних режимів обробки та величини зношення різального інструменту на параметр ЕРС, на постійну та змінну його складову, інтенсивність коливань в різних частотних діапазонах.

Одним вагомим із недоліків даного методу є те, що для вимірювання ЕРС використовують струмознімачі, а інструмент та деталь необхідно ізолювати від маси верстата, що в реальних умовах експлуатації викликає ряд додаткових труднощів.

Метод контролю стану різального інструменту на основі вимірювання ЕРС є найбільш поширеним у виробництві та найбільш теоретично обґрунтованим. Значення ЕРС всіх різальних кромки інструменту визначають перед початком обробки, потім обчислюють середньоарифметичне значення ЕРС. По одержаному значенням ЕРС визначають допустиму швидкість різання, по якій встановлюють стійкість різальної кромки з максимальним значенням ЕРС, і по відношенню заданої стійкості всього комплексу різальних кромки інструменту до стійкості різальної кромки з максимальним значенням ЕРС [48].

Розглянутий метод контролю стану різального інструменту на основі вимірюванні ЕРС різання дозволяє дуже точно оцінювати стан інструменту та може бути використаний в умовах автоматизованого виробництва. Але незважаючи на це все в даного методу є один вагомий недолік, а саме неможливість використання при обробці неметалічних матеріалів.

Метод контролю зношення інструменту по постійній складовій ЕРС. Вимірювання постійної складової ЕРС за допомогою природної термопари. Збільшення сигналу ЕРС із зношенням інструменту несуттєве, а враховуючи, що в каналі вимірювання присутні похибки, контроль зношення інструменту по постійній складовій ЕРС є проблематичним. Не виключено, що для окремих випадків обробки з певними режимами різання, оброблюваними і інструментальними матеріалами, способами кріплення різальної пластинки і т.д., існує зв'язок між постійної складової ЕРС і зношенням інструменту [3].

При механообробці особливо важкооброблюваних матеріалів інструмент схильний до високого зношення. Нестабільність властивостей інструментального і оброблюваного матеріалу обумовлюється неможливістю надійно прогнозувати поточний стан інструменту, а, отже, гарантувати надійність здійснення процесу різання. Необхідний поточний контроль зношення інструменту, тобто його цілісності.

Контроль в процесі обробки найбільш ефективно здійснюють безконтактними або віброконтактними датчиками, які можуть контролювати розміри виробу, положення різальної кромки інструменту або робочих механізмів верстату. До пристроїв, що працюють за непрямим методом, відносяться датчики сигналів, тобто шляхові датчики, що сигналізують про виконання певних переміщень, шляхові перемикачі, які замикають або розмикають електричний ланцюг управління в момент, коли рухома частина верстату досягає певного положення, а також різні види кінцевих вимикачів і упорів [34].

У гнучких виробничих системах (ГВС) необхідно використовувати прогресивні технологічні процеси з широким впровадженням лазерної техніки

для обробки поверхонь, загартування елементів деталей і контролю оброблених деталей. Інструмент для ГВС повинен відповідати таким вимогам по стабільності якості, як взаємозамінність, відсутність відколів і тріщин, стабільна стійкість [55]. Для цього доцільно застосовувати твердосплавний інструмент з покриттями, такими як мінералокераміка і надтвердими матеріалами [2].

Операції активного контролю можуть здійснюватися як під час виготовлення виробу, так і по закінченню виготовлення. У другому випадку контроль якості обробки виробів проводиться після виходу їх з машини. Якщо контрольований параметр відхиляється від заданого значення понад допуск, то автоматично відбудеться підналагоджування машини, коректування технологічного процесу обробки, зупинка машини в разі виходу з ладу інструменту або наявності несправностей у ній [49]. Тут немає недопущення виробництва бракованої деталі. Результати контролю позначаються тільки на наступній деталі. Можливість виробництва браку значно зменшується, але ще не виключається [12].

Точність систем активного контролю, тобто точність комплексу технологічної оброблювальної системи (ТОС), в основному визначається некомпенсованими технологічними похибками. Стабільність технологічного процесу залежить від жорсткості ТОС, стійкості до зношення інструменту і теплового режиму обробки. Відповідно до цього похибки обробки підрозділяють на силові, теплові та на похибки, що виникають в результаті зношення різального інструменту. Перевага того чи іншого виду технологічної похибки, як правило, визначає вибір методу регулювання точності. Так, при порівняно повільних змінах налаштування верстату, пов'язаних з тепловими деформаціями і зношенням інструменту, можуть застосовуватися методи статистичного регулювання точності. У міру збільшення інтенсивності зношення інструменту повинен здійснюватися перехід до автоматичних підналагоджувальних систем (автопідналадчиками). У разі переважання силових похибок, пов'язаних зазвичай з властивостями кожної окремої

оброблюваної деталі, а також при інтенсивному і нерівномірному зношенні інструменту повинні застосовуватися пристрої безпосереднього активного контролю.

Таким чином, діагностування стану різального інструменту - актуальне завдання системи автоматичного керування (САК), яка в багатьох діючих системах вирішується в ході контролю тривалості циклу обробки та загального часу різання. Корисність контролю тимчасового параметра характеризується тим, наскільки близько до реальних умов визначений статистичний період нормального зношення інструменту і яке значення ресурсу задано в системі керування для кожного виду інструменту в різних умовах механообробки. Практика експлуатації САК показує, що складність динамічної системи ТОС і наявність багатьох зовнішніх впливів на процес різання знижують вірогідність контролю тимчасового параметру. Різні види порушення працездатності різального інструменту і навіть його поломка найчастіше виникають випадково. Тому функцію контролю тимчасового параметру слід розглядати лише як допоміжну у забезпеченні надійної та високопродуктивної механообробки [25].

Розглянемо рішення даної задачі на прикладі токарного оброблення на верстаті з ЧПК. Крім здійснення самого процесу обробки необхідно підготувати керуючу програму, а потім відтворити її, передаючи команди від носія програми до виконавчих органів верстату [54]. Крім раніше розглянутих первинних похибок, тут виникає додаткова, що вноситься системою програмного керування [39]. Похибка підготовки програми в кожному конкретному випадку обробки партії заготовок - величина постійна, тобто вона входить за знаком радикалу і замінює собою величину. Вона включає в себе похибки обчислення координат опорних точок траєкторії руху інструменту, похибки апроксимації та інтерполяції. Похибки обчислення координат опорних точок мають малі значення; якщо великі похибки легко виявляються, то малі не завжди можуть бути виявлені і усунені при наступному контролі програми [29].

Параметри зношення різальної кромки інструменту вимірюють прямими і непрямыми методами. У ГВС зазвичай проводять контроль стану інструменту

саме в ході обробки заготовок як найбільш оперативний, достовірний і який не збільшує загального виробничого циклу введенням додаткових численних контрольних операцій. Порухення працездатності інструменту при такому контролі піддається прогнозуванню, а випадкова поломка може бути своєчасно виявлена [36].

Висновки до розділу

1. Методи безпосереднього контролю зношення інструменту володіють малою універсальністю, складністю по конструктивному виконанню, мають низьку перешкодозахищеність, ненадійні в процесі експлуатації на виробництві.

2. Застосування методів та засобів контролю зношення інструменту по силовим параметрам вимагає установки динамометричних пристроїв, що знижує жорсткість технологічної обробляючої системи (ТОС) та універсальність верстату. При чистовій обробці, коли сили різання співрозмірні з силами тертя у вузлах верстату, контроль зношення інструменту по силовим параметрам є проблематичним.

3. Контроль зношення інструменту на основі вимірювання постійної складової ЕРС проблематичний в зв'язку з технічними труднощами, які зв'язані зі зняттям електричних сигналів з деталі, що обертається та електричної ізоляції інструменту та деталі від маси верстату.

4. Створення засобів контролю зношення інструменту по змінній складовій ЕРС дещо складні у конструктивному плані, але в свою чергу дають досить малу похибку вимірювання, при цьому змінна складова ЕРС різання являється однією з найбільш інформативним сигналом в процесі різання.

5. Проаналізувавши існуючі методи контролю стану різального інструменту можна зробити висновок, що система контролю процесу обробки деталей повинна базуватися на вимірюванні та аналізі двох або більше параметрів процесу різання, а саме потужності різання та змінної складової ЕРС.

6. Моніторинг потужності різання дозволить своєчасно втручатися в процес обробки та проводити заходи задля уникнення надзвичайних ситуацій, відслідковувати стан різального інструменту та технічний стан обладнання.

7. II. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ПОТУЖНОСТІ РІЗАННЯ ТА ЗМІННОЇ СКЛАДОВОЇ ЕРС ІЗ ЗНОШЕННЯМ ТА ПОЛОМКОЮ ІНСТРУМЕНТУ

Підвищення ефективності обробки матеріалів різанням безпосередньо пов'язане із створенням нових і вдосконаленням існуючих методів та засобів контролю працездатності різального інструменту, які повинні базуватися на поглибленому уявленні про фізичну суть процесу різання і дослідженні взаємозв'язку явищ, що виникають при різанні, із зношенням різального інструменту.

2.1. Фізичні основи процесу обробки деталей приладів

Процес різання — це формоутворення нової поверхні заготовки, на яку необхідно витратити певну кількість енергії. Одне з визначень пояснює процес різання, як руйнування з появою і розвитком тріщин. Інше визначення, яке засноване на підставі мікрофотографування зони в якій з'являється стружка пояснює, що різання ґрунтується на процесі пластичної текучості. Можна стверджувати, що процес появи стружки — це процес пластичного зрушення, що не є нічим іншим, як в'язке руйнування, пов'язане з явищем пластичної деформації [2].

На поверхні контакту інструменту з деталлю відбуваються зміни стану внутрішнього руху атомів і молекул, що і визначає електромагнітні явища. В результаті цього на контактних поверхнях здійснюються складні реакції переміщень, розкладань і з'єднань мікрочасток. Будь-яка матеріальна система завжди прагне до стану, який характеризується мінімумом енергії [52]. Оскільки процес різання це перш за все процес руйнування, що супроводжується переходом елементарних частинок із стану з великим значенням енергії в стан з меншим значенням енергії, то виділяється на першому етапі взаємодії частин надмірної енергії у вигляді пружних і електромагнітних хвиль, а також у вигляді електричної енергії [17].

В результаті пластичної деформації при різанні атоми, що знаходяться у момент перескоку в ядрі дислокації, здійснюють коливання, що супроводжується випромінюванням електромагнітних хвиль. З другого боку коливання атомів призводять до появи так званих "активних центрів" із зниженою роботою виходу електронів у околицях дефектів структури. При цьому деякі електрони виходять на межу розділу "інструмент-деталь", з'являється різниця електричних потенціалів між контактними поверхнями, що супроводжується генеруванням електричних сигналів [7].

На підставі розгляду процесу різання на фізичному рівні можна зробити висновок про те, що процес появи стружки супроводжується генеруванням електричних сигналів. У зв'язку з цим електричні сигнали із зони різання повинні нести інформацію про процеси, що відбуваються на контактних поверхнях різального інструменту з оброблюваною деталлю [12]. Тому, вимірювання в процесі різання електричних сигналів із зони різання дозволить здійснити діагностику працездатності різального інструменту.

2.2. Основні причини виникнення змінної складової ЕРС різання

Зазвичай, процеси генерування відбуваються за участю якого-небудь зовнішнього джерела, енергія якого витрачається на розриви електричних зв'язків, що існують між зарядами в речовині. При різанні металів такою зовнішньою енергією є механічна енергія, що витрачається на процес відділення стружки від заготовки [22].

У металевих кристалах всі електрони розташовані в зоні провідності. Розподіл цих електронів по енергетичних станах зони провідності визначається розподілом станів в зоні і вірогідністю їх заповнення. Розподіл станів характеризується функцією щільності станів $g(E_e)$, яка має вид параболи (рис. 2.2.1.) і виражається у вигляді [21]:

$$g(E_e) = 4\pi \cdot \left(\frac{2m_d}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot E_e^{\frac{1}{2}} \quad (2.2.1.)$$

де m_d — ефективна маса щільності стану електронів, кг;

h — постійна Планка, Дж·с;

E_e — енергія електрону, Кл.

Фізичний сенс енергії Фермі (рис. 2.2.2) відповідає самому верхньому рівню провідності, заповненому електронами при нульовій температурі.

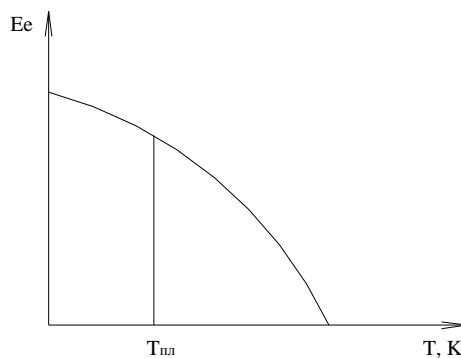


Рисунок 2.2.2 Залежність енергії електрону E_e від температури θ .

В загальному вигляді енергія електрону визначається наступним чином:

$$E_e = \frac{3}{5} \cdot E_\phi(0) + \frac{(\pi \cdot k \cdot T)^2}{4E_\phi(0)} \quad (2.2.2)$$

Перший доданок в формулі (2.2.2) характеризує середню енергію електрону при нульовій температурі і називається "нульовою" енергією, яка має квантову природу. "Нульова" енергія залежить від концентрації вільних електронів і ефективної маси щільності станів електронів. Пластичні деформації виникаючи в процесі різання металів збільшують густину дислокації на чотири порядки, при цьому змінюється величина ефективної маси щільності станів електронів, що і дозволяє деяким електронам набути енергію достатню для подолання потенційного бар'єру і вийти на межу розділу між

інструментом і деталлю. Описаний процес — це процес електризації, що відбувається при різанні [47].

Другий доданок в формулі (2.2.2) залежить від температури і характеризує "теплову" енергію електрону. Порівняння величин "теплової" і "нульової" енергії електронів показує, що навіть при температурах плавлення "теплова" енергія електрону складає одиниці відсотків від "нульової" енергії. Така слабка чутливість електронів в металах до нагріву витікає з самого характеру функції розподілу електронів. Не дивлячись на те, що значення "теплової" енергії невелике, все ж таки мала частина електронів набуває енергії, яка перевищує середню і може виявитися достатньою для подолання сил, що перешкоджають виходу електронів з металу [47]. Хоча таких електронів мало, але саме вони обумовлюють процес термоелектронної емісії, який характеризується залежністю струму емісії від температури і роботи виходу електрону. Термоелектронна емісія є одним з компонентів термоелектричної складової ЕРС різання, вважають основною причиною генерування електричних сигналів при різанні. Приведений вище аналіз показує, що при різанні металів, коли температура в зоні контакту інструменту з деталлю не перевищує температуру плавлення, енергія електрону визначається перш за все "нульовою" енергією, яка залежить від ступеня пластичної деформації.

Термоелектричні явища пов'язані з виникненням електрорушійних сил в ланцюзі різнорідних провідників, в яких є градієнт температури. Це явище було відкрито Зебеком у 1826 році. Ефект оборотного виділення або поглинання теплоти в спайці двох різнорідних металів, коли через нього протікає електричний струм відкритий Пельтьє. Ефект Пельтьє не є контактним явищем, а залежить від властивостей металів пари. Третій термоелектричний ефект — ефект Томсона, який полягає в оборотному виділенні або поглинанні теплоти в однорідному провіднику, по якому протікає електричний струм, при одночасній наявності градієнта температури. Поза сумнівом, що ці термоелектричні ефекти мають місце при різанні металів і змінять частку термоелектричної складової в інтегральній ЕРС різання.

Як вже наголошувалося, енергію електрону можна змінити під дією пластичної деформації. Це явище називається низькотемпературною (екзоелектронною) емісією або ефектом Крамера. Екзоелектронна емісія виникає в результаті спотворення електронного енергетичного спектру твердого тіла і подальшою перебудовою його електронної структури, пов'язаної з появою дефектів. Саме пластична деформація, супроводжуюча процес різання металів, приводить до появи і розмноження дефектів кристалічної решітки металу, що збільшує густину дислокацій на чотири порядки. Отже, пластична деформація при стимулюванні температурою, окисленням, фазовими перетвореннями є основним видом енергетичної дії, відповідальним за емісію так званих "екзоелектронів" при різанні металів.

У роботі [29] указується, що при різанні металів в площині ковзання локалізований потік дефектів кристалічної решітки, який збуджує електрони металу, є основною причиною виникнення електричних сигналів при різанні.

Емісія високо енергетичних електронів може виникнути у високому вакуумі. Високий вакуум при різанні утворюється тоді, коли основним видом зношення є адгезія. При розриві адгезійного шву в мікроскопічних об'ємах неначе вдавлюється повітря. Враховуючи, що в зазорі між обгортками умовного конденсатора виникає енергетичне поле, то емісію швидких електронів можна ототожнити з автоелектронною емісією. Автоелектронна емісія є чисто квантовим ефектом, зв'язаним хвиловими властивостями електронів, і роль електричного поля зводиться до формування відповідного потенційного бар'єру. Зовнішнє прискорююче електричне поле знижує потенційну енергію за межами твердого тіла і міняє форму потенційного бар'єру, що спричиняє за собою утворення потоку вільних електронів.

Поява ЕРС в твердих тілах внаслідок збільшення елементарних носіїв електричного заряду звуковими і ультразвуковими хвилями, носить назву акустоелектричного ефекту або емісією хвиль напруг, що і є четвертою причиною генерування електричних сигналів при різанні [35].

Емісія хвиль напруги виникає при різанні за рахунок утворення хвиль механічної напруги, коли точки фактичного контакту інструменту з деталлю деформуються. В роботі [34] наголошується, що, якщо локальний тиск на контакті не перевищує межі пружності м'якшого матеріалу, то в матеріалі від деформуючого контакту розповсюджуватиметься пружна хвиля. Якщо тиск досягає межі текучості матеріалу, то в об'ємі тіла розповсюджуватимуться дві хвилі напруги: пружна і за нею пластична. Аналіз одержаної залежності показує, що різниця потенціалів від емісії хвиль напруги залежить від електричних і акустичних властивостей матеріалу, а також від інтенсивності хвиль при взаємодії поверхонь [45].

При різанні металів виникають коливання і хвилі різних частот, тому ЕРС від емісії хвиль напруги складатиметься з суми ЕРС відповідним всім складовим спектру частот. Це є однією з причин того, що в ЕРС різання присутня змінна складова в широкому діапазоні спектру частот.

Змінна складова ЕРС різання характеризує коливання енергії на контактних поверхнях різального інструменту і деталі. Величина і характер зміни змінної складової ЕРС різання залежить від тих чинників, які впливають на величину зношення різального інструменту. До таких чинників відносяться: фізико-механічні властивості інструменту і деталі, а також їх неоднорідність, тиск, фактична площа торкання, швидкість відносного руху, вібрації, стан контактуючих поверхонь, процеси руйнування і так далі [24].

Змінна складова ЕРС стосовно тертя металів є в залежності від зміни потенціалів в поверхневих шарах пар, що труться, від різних чинників дасть можливість встановити зв'язок зміни цих потенціалів величиною зношення поверхні, що треться, оскільки приріст потенціалу характеризує процес збільшення енергії в поверхневому шарі пари, що треться, і є еквівалентною величиною кількості маси в поверхневому шарі, руйнованій в процесі тертя. Все що було сказано по відношенню до процесу тертя можна перенести і на процес різання.

Таким чином ЕРС різання можна представити у вигляді суми ЕРС:

$$E = E_T + E_{EK} + E_{AB} + E_{XH} \quad (2.2.3)$$

де E - результуюча ЕРС різання, В;

E_T - ЕРС, яка виникла в результаті термоелектронної емісії, В;

E_{EK} - ЕРС, яка виникла в результаті екзоелектронної емісії, В;

E_{AB} - ЕРС, яка виникла в результаті автоелектронної емісії, В;

E_{XH} - ЕРС, яка виникла в результаті емісії хвиль напружень.

Найбільший приріст ЕРС відповідає дрібнозернистій сталі 8ХФ, молибдену, берилію, пластичній сталі 10 і нікелю. Сталі, близькі по хімічному складу, перш за все за змістом вуглецю і хрому також піддаються достатньо великому приросту ЕРС. Сталі з підвищеним вмістом вуглецю і що відрізняються високою стійкістю до зношення мають найменший приріст ЕРС, тоді як дрібнозернисті і пластичні замикають ряд. Іншими словами, спостерігається та ж тенденція, що і для матеріалу інструменту твердих сплавів [18]. Збільшення карбідоутворюючих елементів в оброблюваному матеріалі викликає зростання ЕРС. При обробці таких матеріалів крива $E(V)$ досягає точки перетину і насичення значно раніше швидкості різання. Відношення R_σ/R_k . Для цих матеріалів, яке характеризує площу контакту, буде меншим, ніж для дрібнозернистих і пластичних матеріалів. Навантаження на контакт, яке визначається перетином зрізу, реалізується на меншій фактичній площі, що створює умови для реалізації в контакті максимального числа мікровиступів, і насичення кривої $E(V)$ відбувається при меншій швидкості.

Спільність, властива механізму впливу на ЕРС як оброблюваного матеріалу, так і матеріалу інструменту знаходиться в хорошій відповідності із запропонованою моделлю генерування ЕРС, яка є принципово симетричною відносно контактуючих поверхонь [50].

З цієї причини у разі контакту однойменних матеріалів в зоні помірних швидкостей, сигнал носить знакозмінний характер. Виявлена спільність дозволяє зробити висновок про симетричність процесу різання з погляду

генерування ЕРС, який є специфічною фрикційною парою. Тоді вплив карбідоутворюючих елементів пов'язане із стираючою дією оброблюваного матеріалу. При порівнянні ЕРС різання для частин одного прутка сталі 40Х, який піддали різній термообробці, спостерігаються дві тенденції: збільшення ЕРС із зростанням твердості оброблюваного матеріалу і зростання ЕРС із збільшенням зернистості переливу і переходом його в пластичний стан. Відомо, що паралельно збільшується і витираюча здатність сталі 40Х. Проте основним механізмом впливу твердості оброблюваного металу на ЕРС є підвищення тиску на поверхні розділу. Екстремальні витираючі умови створили при обробці чистового кремнію. При цьому ЕРС різання досягає сотень мілівольт, тобто збільшується на порядок. Виходячи з термоелектричної моделі, полярність ЕРС різання аномальна, а її величина дає мінімально можливу температуру різання більше 2300° С.

Отже, зіставлення традиційних характеристик оброблюваності металів з ЕРС різання дозволяє дійти висновку про те, що вона відображає реальну зміну їх властивостей в процесі різання, тобто є інформативним сигналом.

Екзоелектронна, автоелектронна емісії і емісія хвиль напруги впливають на "нульову" енергію електрону, а термоелектричні явища змінюють частку "теплової" енергії в загальній енергії електрону. Раніше вважали основною причиною генерування електричних сигналів при різанні термоелектричні явища ($E = E_T$) [47]. Проте, всі чотири складові рівноцінні і до того ж взаємозв'язані між собою. Одні і ті ж контактні поверхні інструменту з деталлю можуть бути джерелами генерування термоелектронів, екзоелектронів, автоелектронів і електронів хвиль напруги. Представлений вище аналіз показує, що енергія електрону, що визначає електричні явища при різанні, залежить від концентрації електронів в матеріалі інструменту і деталі, температури і ступеня пластичної деформації.

Виходячи з цього, електричні сигнали є комплексним параметром, що характеризує процес різання металів на фізичному рівні.

2.3. Взаємозв'язок змінної складової ЕРС різання зі зношенням різального інструменту

В результаті досліджень, проведених останнім часом, було встановлено, що, використовуючи електричні явища, можна, з одного боку, одержати важливу інформацію про процеси тертя і зношення інструменту, а з іншої — управляти зношенням тертьових пар і різального інструменту [6]. Куксенова Л.І. виділила групу явищ, пов'язаних з електричними, електрокінематичними і іншими процесами, що відбуваються при терті, і підкреслила необхідність їх подальшого вивчення [6].

Природу адгезії можна пояснити виникненням металевого зв'язку при зближенні поверхонь на відстань порядку параметру кристалічної решітки і перевищення певного енергетичного порогу для кожної пари матеріалів. Цей енергетичний стан виникає як за рахунок підвищення температури, так і за рахунок сумісної пластичної деформації взаємодіючих поверхонь в точках контакту. Будь-який матеріал можна розглядати як сукупність позитивно заряджених іонів, які розташовані, в ідеальному випадку, у вузлах кристалічної решітки, і великої кількості вільних електронів, що знаходяться в постійній взаємодії одночасно з багатьма іонами даного об'єму матеріалу. Ця взаємодія і визначає цілісність і властивості металевого тіла. За умови зближення кристалів взаємодіючих металів на відстані, сумарній з параметрами кристалічної решітки тіла, вони починають обмінюватися потоками електронів, які проникають через поверхню розділу кристалів. В результаті цього обміну утворюються металеві зв'язки між контактуючими поверхнями. Дана умова виконується за наявності високого локального тиску в зоні контакту, який і забезпечує зближення кристалічних решіток взаємодіючих елементів.

Іншою умовою адгезійної взаємодії є надання електронам додаткової теплової енергії, яка переходить в кінетичну енергію руху електронів за

рахунок підвищення температури в зоні контакту різального інструменту з оброблюваною деталлю.

Електронна будова контактуючих пар впливає на адгезійну взаємодію. Встановлено, що при адгезії відбувається обмін електронами атомів взаємодіючих металів, що призводить до утворення енергетичних стабільних електронних конфігурацій. Чим більше частка локалізованих електронів, тим більша адгезія. На підтвердження цього приводиться залежність коефіцієнта тертя від статичної ваги стабільних конфігурацій.

Ця ідея знайшла своє підтвердження в роботі [46], у якій автор констатував вплив на адгезію s , p , d - електронів. Контакт здійснювався як для однойменних, так і для різнойменних металів. Він припускав, що міцність адгезійного зв'язку пояснюється електронною густиною. Для різнойменних металів міцність адгезійного зв'язку пояснюється різною величиною рівня Фермі і тому додаткові електрони проходять крізь контактні поверхні. У зв'язку з цим можна припустити, що ЕРС різання впливає на міцність адгезійного зв'язку [27].

Міцність адгезійного зв'язку і відповідно адгезійне зношення інструменту залежать від пластичної деформації, температури та електронної будови контактуючих матеріалів інструменту і деталі.

Отже, процеси генерування ЕРС при різанні та утворенні адгезійного шву, який потім руйнується, що приводить до зношення інструменту, безпосередньо залежать від ступеня пластичної деформації, температури і електронної будови контактуючої пари, що і обумовлює їх взаємозв'язок.

В результаті виникнення значного електричного струму між передньою і задньою поверхнями різального інструменту створюються всі умови для перерозподілу компонентів інструментального і оброблюваного матеріалів. Як правило, густина струму на задній поверхні різального інструменту вище за густину струму на передній поверхні [8, 9]. Враховуючи також і те, що на задній поверхні інструменту виникають значні локальні температури можна припустити, що на задній поверхні інструменту відбуваються значніші міграції

компонентів інструментального і оброблюваного матеріалів, чим на передній поверхні. Це підтверджує той факт, що такі методи підвищення стійкості різального інструменту, як ізоляції та компенсації дозволяють зменшити зношення інструменту по задній поверхні, але не впливають на характер протікання і величину зношення по передній поверхні. Таким чином ЕРС різання інтенсифікує дифузійні процеси, що відбуваються на поверхні контакту твердого сплаву різальної пластинки з оброблюваною деталлю [46]. Із збільшенням ЕРС різання збільшується інтенсивність проникнення заліза по кобальтових шарах твердого сплаву, які слабо леговані вольфрамом. Внаслідок чого в кобальтових шарах збільшується розтягуюча напруга, що приводить до інтенсивного зниження міцності зв'язки твердого сплаву.

Дифузійні процеси характеризуються величиною енергії активації, яка залежить від кристалічної структури твердого розчину, розміру зерна, неоднорідності напруженого стану та ін. Енергія активації залежить від взаємного розташування розчинника і розчиненого елементу в періодичній системі: чим далі видалений дифузійний елемент від групи періодичної системи, до якої належить розчинник, тим менше величина енергії активації і тим більше дифузія. Аналогічний взаємозв'язок простежується і між ЕРС різання та зношенням інструменту. Чим далі розташовані елементи інструментального і оброблюваного матеріалів один від одного в таблиці Менделєєва, тим більше величина різниці робіт виходу електронів контакту пари, більше величина ЕРС різання і, отже, зношення інструменту.

Крім цього при різанні може спостерігатися так звана "висхідна" дифузія [11], яка відбувається в умовах, коли до зразку прикладена різниця електричних потенціалів. Електричне поле, що виникає між контактними поверхнями різального інструменту з деталлю, викликає переміщення не тільки електронів, але і іонів. Механізм переміщення іонів є дифузійним, проте сили, що викликають направлене переміщення іонів, обумовлені дією електронів провідності з іонами. Причиною руху іонів є їх зіткнення з електронами

провідності, яка передає іонам свій імпульс. Тому іони рухаються проти поля, подібно до частинок з великим негативним зарядом.

Поза сумнівом існує взаємозв'язок між електричними потенціалами і різновидом абразивного зношення — концентрованим зношенням, яке має місце в основному при чистовій обробці. Мікрочастки, що мають вищу твердість, чим зв'язки матеріалу інструменту, проводять мікрорізи, що супроводжуються елементарним електричним імпульсом, частота якого залежить від швидкості різання і розміру мікрочастки ЕРС різання, а також впливають на зношення інструменту через окислювальні явища, що відбуваються при різанні. Під дією електричного поля, що створюється різницею потенціалів на зовнішній поверхні оксиду відбувається процес міграції катіонів і зростання окисної плівки. Стабільні тонкі плівки оксидів оберігають інструмент від зношення. Проте при посиленні електричного поля прискорюється процес міграції катіонів і товщина плівки оксиду збільшується. При цьому плівка оксиду стає менш стабільною і легко руйнується, що приводить до утворення додаткових точок захоплення інструменту з деталлю і інтенсифікації процесу зношення. Окисні плівки крім того, що грають роль своєрідних напівпровідників, істотним чином впливають на величину роботи виходу електрону інструментального і оброблюваного матеріалів. Міцні окисні плівки збільшують величину роботи виходу електрону, що знижує контактну різницю потенційної ЕРС різання, а також і зношення інструменту. Відповідно протилежну дію надають неміцні плівки оксидів. Слід також відзначити, що окисні плівки впливають на ступінь стабілізації величини роботи виходу електрону і відповідно контактній різниці потенціалів. Флуктуація товщини міцності плівки оксидів приводить до флуктуацій величини роботи виходу електрону і різниці потенціалів між інструментом і деталлю, що приводить до появи змінної складової ЕРС різання.

Отже, ЕРС різання, з одного боку, впливає на зношення різального інструменту, а з іншого — виступає як джерело інформації практично про всі види зношення різального інструменту. А змінна складова ЕРС різання

характеризує зміни фізичних процесів на контактних поверхнях різального інструменту з деталлю.

2.4 Взаємозв'язок процесу різання деталей приладів з потужністю різання

В процесі обробки верстат виконує певну роботу. В залежності від його потужності робота, яка виконується може бути виконана за різний час. Потужність верстату характеризується роботою, яку він виконує за одну секунду.

Зазвичай робота вимірюється в ньютон-метрах (Нм), а потужність – кіловатах (кВт). 1 Нм – це робота яка виконується при піднятті 0,1 кг на 1 м. Потужність в 1 кВт дозволяє виконати за 1 с роботу в 102 кгм або в 1020 Нм.

Потужність в загальному випадку дорівнює потужності технологічного процесу, для виконання якого і створюється привід. Споживана потужність електродвигуна визначається за формулою:

$$S = \frac{P}{\eta \times \cos \varphi} = \sqrt{3} \times U \times I, \text{ кВт} \quad (2.4.1)$$

$$\text{або } S = \sqrt{P_a^2 + Q^2}, \text{ кВт} \quad (2.4.2)$$

де P – механічна корисна потужність на валу (вказана на електродвигуні);

η – коефіцієнт корисної дії (ККД) електродвигуна;

φ – кут між активною та повною потужністю (Рис. 2.4.1);

U – напруга джерела живлення, В;

I – сила струму, А;

P_a - активна потужність, кВт;

Q - реактивна потужність, ВА.

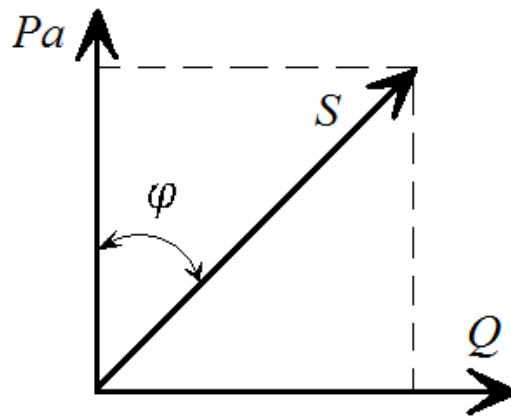


Рисунок 2.4.1 – Векторне представлення потужностей електродвигуна

Активну потужність електродвигуна можна розрахувати за формулою:

$$P_a = \frac{P}{\eta}, \text{ кВт} \quad (2.4.3)$$

або

$$P_a = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi, \text{ кВт} \quad (2.4.4)$$

В той час реактивна потужність розраховується за формулою:

$$Q = \frac{P_a}{\cos \varphi}, \text{ ВА} \quad (2.4.5)$$

Під час проведення обробки відбувається зміна навантаження на привід верстату, що може бути спричинено зміною режимів різання, зношенням різального інструменту, поломкою верстату, тощо. Зміну навантаження можна легко відслідковувати по зміні активної потужності електродвигуна вимірюючи прикладену напругу (U) та силу струму (I), що проходить через двигун в певний момент обробки.

Дійсна потужність різання, що витрачається лише на різання, визначається як:

$$P_{с.д.} = P_a - P_{а.х.}, \quad (2.4.6)$$

де $P_{а.х.}$ - активна потужність двигуна при холостому ході.

Розрахувавши дійсну потужність різання необхідно визначити допустимі межі її відхилення ($P_{с.доп.}^{min}, P_{с.доп.}^{max}$):

$$P_{с.доп.} = P_c \pm (0,05 + k_{в.о.} + k_{в.м.}) \times P_c, \quad (2.4.7)$$

де $k_{в.о.}$ — поправочний коефіцієнт на вид обробки (чорнова, чистова і т.д.); $k_{в.м.}$ — поправочний коефіцієнт на вид обробляючого матеріалу.

Дійсна потужність різання повинна відповідати умові:

$$P_{с, доп.}^{min} < P_{с, д.} < P_{с, доп.}^{max} \quad (2.4.8)$$

Таким чином визначивши дійсну потужність різання (2.4.6) та знаючи її допустимі значення (2.4.7) можна слідкувати за ходом процесу обробки та в разі виходу дійсної потужності різання за допустимі значення (Рис. 2.4.8) негайно вводити коригування в процес обробки.

2.5. Вплив матеріалу інструменту та деталі на змінну складову ЕРС різання

Різальний інструмент в процесі роботи схильний до зношення, який спотворює його форму і тому позначається на ЕРС. Найбільший практичний інтерес представляє вивчення цього зв'язку з погляду можливості отримання на основі ЕРС інформації про зношення інструменту. Зношення інструменту викликає зміну зрівнюючих теплових потоків, що виникають в контактній зоні в момент врізання, що позначаються на температурній складовій ЕРС і термо-ЕРС в стику "пластина-державка" [30]. Пов'язані з цим початкові зміни ЕРС різання можуть служити джерелом інформації про зношення інструменту. Додатково ЕРС різання пов'язана із зношенням через площу фактичного контакту і тиску на поверхні розділу.

Статистичний аналіз показав, що зв'язок виявляється вельми тісним — вірогідність припущення, заперечення його, складає менше 0,1%. Отже, можна стверджувати, що ЕРС і характеристики стійкості пластин з твердого сплаву зв'язані між собою [8]. Ґрунтуючись на цьому, може бути рекомендований вхідний контроль різального інструменту — сортування пластин по ЕРС різання — із застосуванням спеціальних пластин — ЕРС, чим більше допустиме зношення, тим менш вигідно застосовувати пластини з великими початковими ЕРС.

По отриманим даним ЕРС пропорційна вмісту карбідів вольфраму в твердому сплаві, а при постійному хімічному складі — меншій зернистості

твердого сплаву відповідає менша ЕРС. Відомо, що зернистість твердого сплаву в першу чергу визначає його міцність, а зменшення вмісту зв'язки кобальту підвищує твердість твердих сплавів вольфрамової групи [15]. Роль зв'язки у виникненні ЕРС різання оцінена шляхом різання чистого кобальту і виявилася неістотною.

Підтвердженням зв'язку ЕРС з характером тертя є дані по виміру ЕРС різання для пластин із стійкими до зношення покриттями. Найбільша ЕРС відповідає пластині без покриття марки Т16К6, а найменша — з покриттям нітридом титана $ТС^+$. Фрикційна стійкість до зношення покриття обумовлює максимальний час оновлення мікровиступів, що різко знижує ЕРС [16].

Особливості твердих сплавів і одержані експериментальні дані дозволяють інтерпретувати зв'язки ЕРС з якістю твердого сплаву таким чином. При постійному хімічному складі зменшення зернистості і збільшення твердості твердого сплаву дозволяють підвищити міцність поверхневих шарів інструменту і опір виривання мікрочасток карбідів, що визначають, безпосередньо, стійкість до зношення твердих сплавів [25]. Отже, кожен мікровиступ на поверхні твердого сплаву, утворюючий мікроконтакт, де генерується електричний імпульс, рідше оновлюється. Відповідно до вищевикладеного така ситуація повинна понизити ЕРС. Зміна хімічного складу твердого сплаву, що виражається в збільшенні вмісту карбідів за рахунок кобальту, зменшує адгезійну взаємодію, площу фактичного контакту, а отже, і час оновлення, тому ЕРС збільшується.

Зменшення твердості твердого сплаву із зростанням температури викликає зменшення приросту ЕРС, при цьому для твердого сплаву з більшою твердістю при тій же температурі зменшення приросту ЕРС, не залежно від її абсолютної величини, повинно відбуватися повільніше.

В зоні появи наросту присутні відмінності в адгезійній активності карбідів твердих сплавів. Час оновлення мікровиступів для сплаву ВК6 більше через його більшу адгезійну активність, отже, йому відповідає менша ЕРС. На підставі вищевикладеного зв'язок між ЕРС різання і стійкістю до зношення

твердого сплаву можна вважати доведеним та фізично з'ясовним і рекомендувати здійснення вхідного контролю інструменту на основі вимірювання ЕРС різання. Величина ЕРС різання визначається електричним опором R і ємністю C контакту "інструмент-деталь" (рис. 2.4.2), а також величиною кутового прискорення обертання деталі. Збільшення кутового прискорення обертання деталі призводить до збільшення частоти контакту окремих мікрорізців інструменту з деталлю, при цьому інтегральна ЕРС різання зростає. При взаємодії окремих мікроконтактів утворюється диференціальний ланцюг " $R-C$ ", який дає імпульс затухаючого / сигналу (рис. 2.4.1).

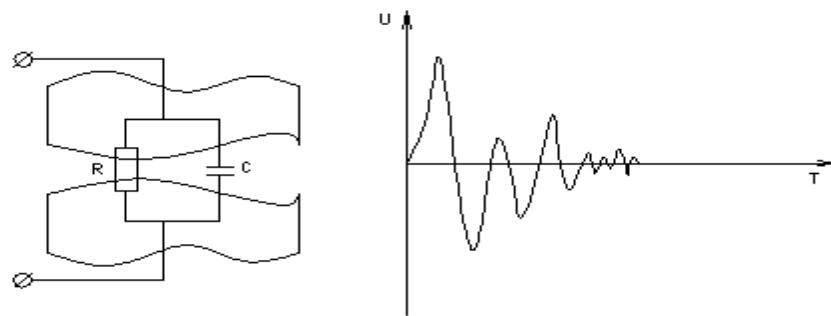


Рисунок 2.4.1 Електричний ланцюг "К-С".

Припустимо, що при візанні інструменту в деталь кількість мікроконтактів інструменту, що входять в контакт з оброблюваною деталлю залишається незмінним і рівним трьом (рис. 2.4.2), при цьому відбувається утворення трьох диференціальних ланцюжків "К-С".

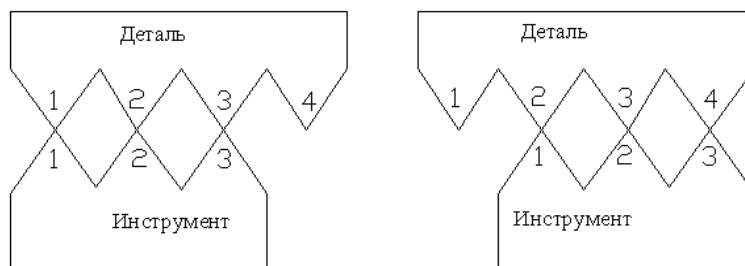


Рисунок 2.4.2 Схема взаємодії мікрорізців.

За час τ_1 кожна пара 1-1, 2-2, 3-3 контактів дає максимальний імпульс сигналу. Через час τ_2 (рис. 2.4.2) мікроконтакти змістяться і контакт

відбудеться між наступною парою 1-2, 2-3, 3-4, причому лише мікроступ 4 ще не вступив у взаємодію, а інші вже віддали свій максимальний первинний заряд. Тому сигнал ЕРС різання матиме пік в початковий момент різання (рис. 2.4.3).

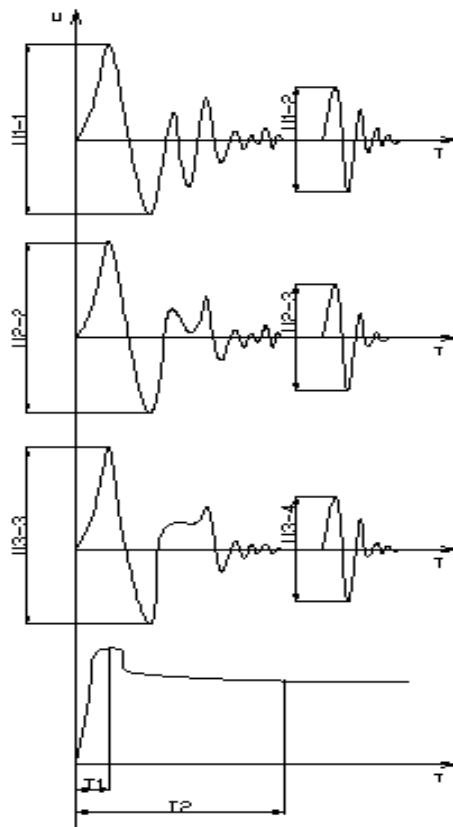


Рисунок 2.4.3 Часова характеристика сигналу ЕРС.

Насправді, при врізанні інструмент зношується, що приводить до збільшення точок взаємодії. Із збільшенням точок взаємодії збільшується сила тертя, зменшується кутове прискорення деталі, що приводить до зменшення інтегральної ЕРС різання [26]. З іншого боку із збільшенням числа точок контакту збільшується фактична площа контакту, а отже і ЕРС різання.

При різанні мають місце дві фази процесу: стаціонарна (при стійкому різанні) і перехідна (при врізанні). Характеристики площ контактних зон визначають величини електричної ємності і опору в областях контакту різального інструменту із стружкою і поверхнею оброблюваної деталі. Так, при гострозаточеному інструменті величини ємності і опору контакту визначаються, в основному, зоною контакту передньої поверхні різального

інструменту із стружкою, оскільки зона контакту на задній поверхні різального клину дуже мала. За наявності фаски зношення по задній поверхні величина ємності і опору контакту визначається сумарною площею контакту зон по передній і задній поверхнях різального інструменту. Електричний опір і ємність контакту по передній і задній поверхнях увімкнені паралельно і утворюють диференціальний ланцюжок, що дає при врізанні (перехідному процесі) так званий стрибок ЕРС, який пропорційний величині кутового прискорення відносного ковзання деталі або інструмента.

Загальна величина ЕРС визначається сумою ЕРС перехідного і стаціонарного процесів. ЕРС перехідного процесу, тобто величина сигналу, що виникає безпосередньо при врізанні інструменту в деталь, пропорційна кутовому прискоренню відносного руху деталі або інструменту і величинам електричних параметрів зони контакту ємності і опору. При гострозаточеному інструменті величина кутового прискорення більша, ніж при зношеному, внаслідок чого ЕРС перехідного процесу, зафіксованого в перші секунди від початку різання, перевищує ЕРС стаціонарного процесу при різанні незношеним інструментом. По відношенню ЕРС стаціонарного, зафіксованого після 5-20 секунд від початку різання, і перехідного процесів можна судити про стійкість до зношення різального інструменту. Чим менше E_i/E_{\max} , тим більша стійкість до зношення.

Отримання інформації про дійсні властивості оброблюваного матеріалу, якими він володіє в процесі різання, є основою характеристикою, на якій повинна базуватися оптимізація робочого процесу. Аналіз показав, що найбільш інформативний вид кривої $E(V)$ (рис. 2.4.4), яка змінюється залежно від розподілу тиску, електричної провідності, а також від характеру і коефіцієнта тертя, структури інструментального матеріалу і інших взаємозв'язаних і взаємообумовлених чинників процесу різання.

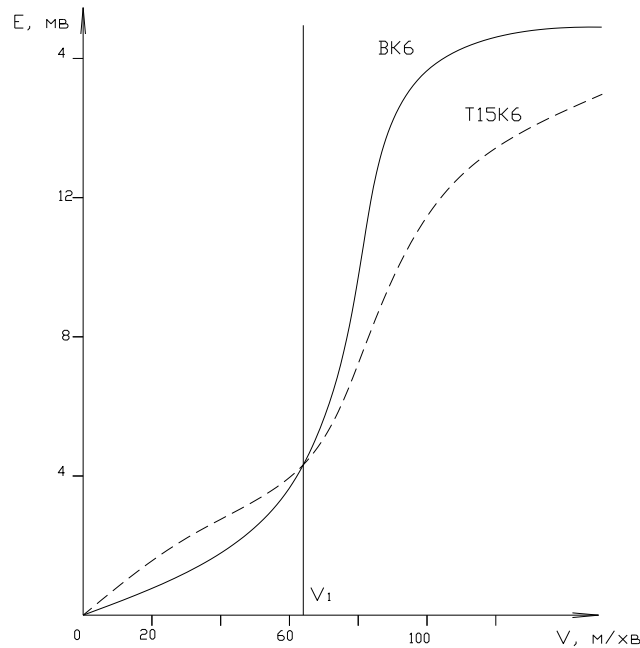


Рисунок 2.4.4 Вплив відмінностей адгезійної активності та розм'ягчення твердого сплаву на ЕРС різання.

Характер кривої для даного оброблюваного матеріалу і режимів обробки міняється залежно від марки твердого сплаву або форми різальної частини пластини. Найбільш істотно при цьому змінюється абсолютна величина ЕРС, швидкість, відповідна перегину кривої $E(V)$, і, значно менше — межа зони появи наросту — V_1 . Криві $E(V)$, одержані в однакових умовах при обробці різних матеріалів для зручності аналізу піддали простій формалізації. Реєстрували швидкість V_1 враховуючи три точки кривої $E(V)$, які, в свою чергу, відповідають швидкостям різання 20, 50 і 100 м/хв, причому в зоні появи наросту разом з фактичним значенням ЕРС — E_ϕ для даної швидкості, враховували і гіпотетичну ЕРС — E_ϕ , яка відповідає відсутності наросту. По відносному збільшенню ЕРС різання, яке характеризується відношенням ЕРС для двох вибраних швидкостей різання 50 і 100 м/хв, розташували оброблювані матеріали.

Найбільший приріст ЕРС відповідає дрібнозернистій сталі 8ХФ, молібдену, берилію, пластичній сталі 10 і нікелю. Сталі, близькі по хімічному складу, перш за все за змістом вуглецю і хрому також піддаються достатньо великому приросту ЕРС. Сталі з підвищеним вмістом вуглецю і що відрізняються високою стійкістю до зношення мають найменший приріст ЕРС, тоді як дрібнозернисті і пластичні замикають ряд. Іншими словами, спостерігається та ж тенденція, що і для матеріалу інструменту твердих сплавів. Збільшення карбідоутворюючих елементів в оброблюваному матеріалі викликає зростання ЕРС. При обробці таких матеріалів крива $E(V)$ досягає точки перетину і насичення значно раніше швидкості різання. Відношення R_0/R_k . Для цих матеріалів, яке характеризує площу контакту, буде меншим, ніж для дрібнозернистих і пластичних матеріалів. Навантаження на контакт, яке визначається перетином зрізу, реалізується на меншій фактичній площі, що створює умови для реалізації в контакті максимального числа мікровиступів, і насичення кривої $E(V)$ відбувається при меншій швидкості.

Спільність, властива механізму впливу на ЕРС як оброблюваного матеріалу, так і матеріалу інструменту знаходиться в хорошій відповідності із запропонованою моделлю генерування ЕРС, яка є принципово симетричною відносно контактуючих поверхонь.

З цієї причини у разі контакту однойменних матеріалів в зоні помірних швидкостей, сигнал носить знакозмінний характер. Виявлена спільність дозволяє зробити висновок про симетричність процесу різання з погляду генерування ЕРС, який є специфічною фрикційною парою. Тоді вплив карбідоутворюючих елементів пов'язане із стираючою дією оброблюваного матеріалу. При порівнянні ЕРС різання для частин одного прутка сталі 40Х, який піддали різній термообробці, спостерігаються дві тенденції: збільшення ЕРС із зростанням твердості оброблюваного матеріалу і зростання ЕРС із збільшенням зернистості переливу і переходом його в пластичний стан. Відомо, що паралельно збільшується і витираюча здатність сталі 40Х. Проте основним механізмом впливу твердості оброблюваного металу на ЕРС є підвищення

тиску на поверхні розділу. Екстремальні витираючі умови створили при обробці чистового кремнію. При цьому ЕРС різання досягає сотень мілівольт, тобто збільшується на порядок. Виходячи з термоелектричної моделі, полярність ЕРС різання аномальна, а її величина дає мінімально можливу температуру різання більше 2300° С.

Отже, зіставлення традиційних характеристик оброблюваності металів з ЕРС різання дозволяє дійти висновку про те, що вона відображає реальну зміну їх властивостей в процесі різання, тобто є інформативним сигналом.

2.6. Взаємозв'язок ЕРС із параметрами шорсткості

Процес різання металів супроводжуються широким рядом відомих фізичних явищ. Одним з цих явищ являється змінна складова ЕРС різання між контактуючими тілами. Взагалі, як вже згадувалось, за допомогою використання вимірювань ЕРС в мовах автоматизованого виробництва можна керувати режимами різання, а також контролювати зношення різального інструменту. ЕРС різання має безпосередній зв'язок з шорсткістю оброблювальної поверхні, і, звичайно, керуючи величиною ЕРС шляхом її компенсації або ізолюючи інструмент, можна на порядок знизити шорсткість оброблювальної деталі. Зниження шорсткості, як правило, залежить від зменшення зношення різального інструменту.

При різанні в місці контакту твердого сплаву з оброблюваним матеріалом електрони з твердого сплаву (з великою електронною густиною) переходять в оброблюваний матеріал (з меншою електронною густиною) і за наявності замкнутого ланцюга "інструмент - верстат - деталь" виникає струм. По поверхні зношення встановлюються молекулярні зв'язки і елементи твердого сплаву безперервно дифундують з поверхні твердого сплаву в оброблюваний матеріал і обумовлюються граничними об'ємами поверхні різання і стружки. Сама дифузія пов'язана тільки з переміщенням атомів від місць з більшою концентрацією до місць з меншою концентрацією. Проте в наслідку постійного контакту двох тіл з негативним і позитивним зарядами

процес перенесення твердого сплаву активізуватиметься. Причому ступінь активізації залежить від величини ЕРС різання. Отже, ЕРС впливає на шорсткість оброблювальної деталі через підвищення зношення інструменту.

Для того, щоб зменшити прямий вплив ЕРС різання на шорсткість деталі потрібно використовувати режим ізоляції різця та деталі, режим компенсації або ж режим введення постійного струму. Проте, численні експериментальні дані по перевірці ефекту суперечливі. Разом з тим важливим є те, що розрив електричного ланцюга технологічного обладнання системи (ТОС) шляхом введення ізолюючих прокладок є простим випадком застосування схеми резистор-конденсатор для іскрогасіння в зоні контакту. Ізолюючі прокладки в цій схемі грають роль конденсатора малої місткості, тому у ряді випадків в схему вводять спеціальні конденсатори. Так, обробка при включеному конденсаторі місткістю 200 мкф в порівнянні з установкою прокладок дало значно велике зменшення шорсткості.

Таким чином, коливання змінної складової ЕРС відображають імпульсний характер процесу різання та показують важливу інформацію про складні фізико-хімічні процеси при обробці деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва, причому у випадку ізоляції різального інструменту присутній трішки інший спосіб руйнування оброблювальної деталі та фізико-хімічних властивостей, чим при відсутності ізоляції.

Слідуючи описаним вище дослідження вплив ЕРС на шорсткість оброблювальної поверхні зменшується внаслідок зменшення зношення різального інструменту, то в нашому випадку необхідно було б відновляти геометрію інструменту кожен раз після попередньої обробки без ізоляції інструменту, як тільки він «переводився» в стан електроізолюваності. Але це твердження не зовсім коректне.

Рух та взаємодія дислокацій в тонких контактних поверхневих мікрооб'ємах, та їх вихід на поверхню призводить до створення своєрідного субмікрорельєфу, у вигляді ступенів зсуву, який впливає на сили зовнішнього

тертя. Між коефіцієнтами тертя та висотою створеного мікрорельєфу існує наступний зв'язок [12]:

$$f = 6.28 \cdot (1 - \nu) \cdot \frac{G_m}{G} \cdot \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho}} \cdot \sin \alpha \quad (2.5.1)$$

де f - коефіцієнт тертя;

ν - коефіцієнт Пуассона;

G – модуль зсуву, Па;

G_m - границя текучості, Па;

ρ_k - кінцева густина дислокацій, $\frac{K\mathcal{Z}}{M^3}$;

ρ - вихідна густина дислокацій, $\frac{K\mathcal{Z}}{M^3}$;

α - кут нахилу площини ковзання.

Відношення кінцевої та вихідної густини дислокацій характеризує деформаційну складову коефіцієнту тертя, а кінцева густина дислокацій характеризує адгезійну складову. Впливаючи на відношення кінцевої та вихідної густини дислокацій можна змінювати коефіцієнт тертя [10]. Одним з таких впливів являється ЕРС різання, яка діючи на дислокації впливає і на пластичну деформацію оброблювального матеріалу. Таким чином можна припустити, що при обробці ізольованим інструментом, ЕРС різання, яка генерується в зоні контакту із заготовкою, полегшує пластичну деформацію металу, цим самим сприяючи зменшенню шорсткості оброблювальної поверхні порівняно з обробкою неізольованим інструментом. Зрівнюючи спектри ЕРС і їх статистичні характеристики при обробці ізольованим та неізольованим інструментом можна побачити істотні відмінності. Тому, зменшення шорсткості оброблювальної поверхні пов'язане із збільшенням середньоарифметичного значення ЕРС та зменшенням дисперсії та середньоквадратичного відхилення. Мабуть такий вид спектру ЕРС сприяє полегшенню пластичної деформації, що може бути пов'язано з декількома

варіантами: великої електризації поверхневого слою, зменшення швидкості окислювальних процесів на ювенільних поверхнях заготовки та інструменту та упорядкуванням теплового руху електронів [19].

Отже, можна зробити висновки, що змінна складова ЕРС різання в умовах автоматизованого виробництва має глибокий зв'язок із зношенням різального інструменту та формуванням поверхневого слою заготовки. Даний факт відкриває перспективи для створення систем контролю обробки деталей в умовах автоматизованого виробництва шляхом вимірювання змінної складової ЕРС різання.

2.7. Розробка і аналіз математичної моделі зношення різального інструменту на основі потужності та змінної складової ЕРС різання

В процесі роботи різального інструменту відбувається зміна форми його задньої поверхні і контуру різальної кромки, що спричиняє появу зношення різального інструменту та утворення канавки на задній поверхні різального інструменту. Це зношення безпосередньо впливає на шорсткість оброблюваної поверхні, що може говорити про нерівномірність контактних процесів, які представляють собою змінну складової ЕРС різання [31]. Після цього можна стверджувати, що найбільше джерело ЕРС локалізоване на задній поверхні інструменту. Тому електрична провідність на задній поверхні є вищою в порівнянні з провідністю на передній поверхні різального інструменту.

На основі експериментів ЕРС різання виражається за допомогою формули [3]:

$$E = U \frac{S_r}{f_n \cdot t} \cdot e^{-\frac{d}{v \cdot \tau_0}} \quad (2.7.1)$$

де U - контактна різниця потенціалів, В;

S_r - площа контакту інструменту з деталлю, мм²;

f_n - подача на оберт, мм/об;

t - глибина різання, мм;

d - середній діаметр плями контакту інструменту з деталлю, мм;

v - параметр ступені апроксимації ділянки опорної поверхні деталі в зоні різання;

τ_o - постійна стружкоутворення, с.

Дослідження показують, що на задній поверхні інструменту присутній пружно-пластичний контакт, що виникає в результаті хвилі пружного відновлення. Слід відмітити, що при обробці цілого ряду металів, особливо при чистовій обробці, інструмент переважно зношується по задній поверхні. При обробці деталей з чавуну, бронзи, латуні і інших крихких матеріалів утворюється стружка надлому, яка ковзає по передній поверхні інструменту. В цьому випадку з найбільшою інтенсивністю зношується головна задня поверхня інструменту. Аналогічна картина спостерігається і при різанні пластичних матеріалів в тих випадках, коли обробка ведеться з малою товщиною зрізу. При обробці матеріалів з пластичних металів малою або середньою для даного інструментального матеріалу швидкістю і товщиною шару, що зрізається, від 0,1 до 0,6 мм спостерігається, приблизно, однакова інтенсивність зношення як задньої, так і передньої поверхні інструменту.

Одним з основних параметрів, що визначає інтенсивність зношення інструменту є потужність різання. Потужність різання розраховується за наступною формулою [56]:

$$P_C = \frac{V_C \cdot t \cdot f_n \cdot k_{c0.4} \cdot k_{\rho\phi} \cdot k_{\rho f}}{60 \cdot 10^3} \quad (2.7.2)$$

де V_C – швидкість різання, м/хв;

t – глибина різання, мм;

f_n – подача на оберт, мм/об;

$k_{c0.4}$ – питома сила різання, залежить від виду і властивостей оброблюваного матеріалу і дорівнює нормальній силі різання при зрізанні стружки перетином 1 мм² з подачею 0.4 мм/об, МПа;

$k_{\rho\varphi}$ – поправочний коефіцієнт на головний кут в плані;

$k_{\rho f}$ – поправочний коефіцієнт на величину подачі;

У роботах [8-10] вказується, що при обробці деталей приладів різальним інструментом в умовах автоматизованого виробництва при відносно не великій потужності різання адгезійне зношення здійснюється шляхом крихкого руйнування великих і викидання дрібних зерен карбідів. Поява мікротріщин сприяє розриву більшого числа зерен карбідів, у тому числі і великих, таких, що глибоко залягають. Із збільшенням потужності різання крихке руйнування зерен карбиду виключається і зношення зменшується. При подальшому підвищенні потужності інтенсивність зношення збільшується унаслідок викидання карбідів. Цьому сприяє інтенсифікація процесів пластичної течії на контактних поверхнях. Характерним для пластичної течії є зниження міцності міжфазних меж зерен, розм'якшення і порушення зв'язків між зернами карбідів і їх зрушення. Це створює умову для інтенсифікації адгезійного руйнування твердих сплавів при високій потужності різання шляхом відриву як дрібних, так і великих зерен карбідів. Проте поблизу різальної кромки частка адгезійних руйнувань при високих швидкостях різання в загальному об'ємі мала, тому зношення слід класифікувати як пластичне.

В результаті зношення по задній поверхні зменшується задній кут, при цьому контакт з оброблюваною деталлю відбувається по задній поверхні, утворюючи додаткове джерело тепловиділення, що у свою чергу викликає різке збільшення зношення різального інструменту [28]. За наростанням настає область, де відбувається об'ємний перебіг м'якшої поверхні, зварювання і розрив контактуючих поверхонь. Отже, при роботі в умовах низької потужності визначальним видом зношення є абразивне зношення, яке обумовлене наявністю в матеріалі заготовки частинок твердіших, ніж інструмент. При підвищенні температури розділові плівки між інструментом і деталлю руйнуються, виникає чистий металевий контакт, тобто відбувається зварка ювенільних поверхонь. При подальшому підвищенні температури

відбувається розрив адгезійних зв'язків двох матеріалів, що приводить до різкого підвищення зношення різального інструменту.

Використовуючи дані формули (2.7.1 та 2.7.2) та знаючи величину наявного зношення різального інструменту (Δh_3) можна провести аналіз ступені зношення різального інструменту в даний момент (h_3), розраховуючи інтенсивність зношення (j_3). Для цього необхідно використати наступну математичну модель зношення різального інструменту, по якій можна здійснювати прогнозування зношення інструменту [36].

Математична модель зношення різального інструменту в умовах автоматизованого виробництва основана на вимірюванні змінної складової ЕРС різання та потужності виглядає наступним чином:

$$h_3 = \Delta h_3 \cdot k_w \cdot j_3 \cdot U \cdot \frac{S_r \cdot V_c \cdot k_{c0.4} \cdot k_{\rho\phi} \cdot k_{pf}}{P_c \cdot 60 \cdot 10^3} \cdot e^{-\frac{d}{v \cdot \tau_0}} \quad (2.7.3)$$

де h_3 - ступінь зношення різального інструменту, мм;

Δh_3 - наявне зношення різального інструменту, мм;

k_w - поправочний коефіцієнт по співвідношенню зношення інструменту і змінної складової ЕРС різання, який визначається експериментально для різних комбінацій матеріалів “інструмент-деталь”;

j_3 - інтенсивність зношення різального інструменту;

U - контактна різниця потенціалів, В;

S_r - площа контакту інструменту з деталлю, мм²;

V_c – швидкість різання, м/хв;

$k_{c0.4}$ – питома сила різання, залежить від виду і властивостей оброблюваного матеріалу і дорівнює нормальній силі різання при зрізанні стружки перетином 1 мм² з подачею 0.4 мм/об, МПа;

$k_{\rho\phi}$ – поправочний коефіцієнт на головний кут в плані;

k_{pf} – поправочний коефіцієнт на величину подачі;

d - середній діаметр плями контакту інструменту з деталлю, мм;

ν - параметр ступені апроксимації ділянки опорної поверхні деталі в зоні різання;

τ_o - постійна стружкоутворення, с;

Особливу увагу слід приділити впливу різниці потенціалів U , який безпосередньо впливає на змінну складову ЕРС різання, на задній поверхні різального інструменту на його зношення. З (2.7.3) ступінь впливу різниці потенціалів U на задній поверхні інструменту на зношення h_z залежить від параметру ν . Встановлена межа величини ν від 0,4 до 2,0. Тому при $0,4 < \nu < 1$ величини h_z і U прямопропорційні, при $1 < \nu < 2$ - оберненопропорційні, а при $\nu=1$ h_z і U є незалежними величинами. На рис.2.7.1. представлений графік $h_z = f(U)$ для різних ν .

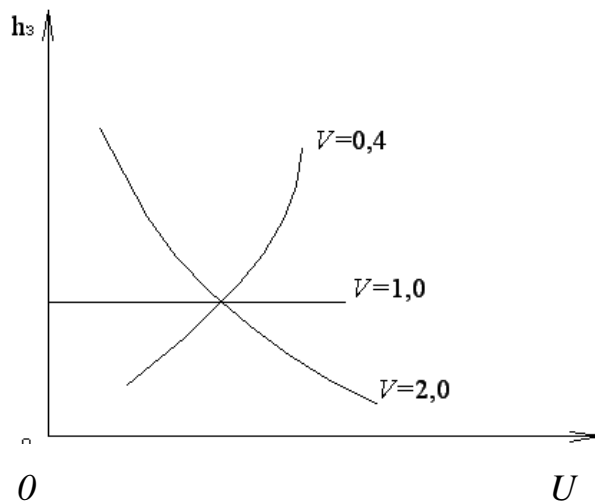


Рисунок 2.7.1 Дія змінної складової ЕРС різання на зношення різального інструменту для різних величин параметру ступені апроксимації ділянки опорної поверхні деталі в зоні різання.

Також можна відзначити, що із збільшенням контакту інструменту з деталлю збільшується змінна складова ЕРС різання, а залежність зношення від змінної складової ЕРС різання або потужності різання носить досить складний

характер, який залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного і інструментального матеріалів.

Збільшення головного кута в плані може трішки зменшити зношення. Із збільшенням φ зменшується температура, а також змінюється напрям дії результуючої сили різання, що оберігає інструмент від зношення [40].

Дослідження показують, що електричні явища істотним чином впливають на стійкість різального інструменту. Найбільше підвищення стійкості інструменту може бути отримане за умови зовнішньої компенсації. Дійсно, згідно отриманої нами формули, при $U \rightarrow 0$, величина зношення різального інструменту зменшується за інших рівних умов.

Там же указується, що електричний струм, що підводиться, сприяючи окисленню поверхні контакту, змінює коефіцієнт тертя і інтенсивність зношення. Слід зазначити, що очевидно, не стільки змінюється коефіцієнт тертя, скільки змінюється змінна складова ЕРС різання, а також величина σ_T . За рахунок чого відбувається зміна зношення різального інструменту.

Аналіз останньої формули показує, що U і h_3 лінійно залежні величини. Цим можна пояснити, що по початковій ЕРС різання можна судити про зношення різального інструменту, на чому і заснований вхідний контроль різальних пластинок. Параметри, що входять до цієї формули взаємопов'язані і лише в деякому наближенні можна виразити залежність величини зношення різального інструменту від якого не будь параметру.

Безперервні флуктуації в процесі різання температури контактних поверхонь, сил різання, товщини окисної плівки, мікрогеометрії взаємодіючих поверхонь приводить до зміни відповідно межі текучості (σ_m) оброблюваного матеріалу, контактної різниці потенціалів (U), діаметру плями контакту (d), параметру ν ступені апроксимації ділянки поверхні деталі в зоні різання. Змінна складова ЕРС відображає нестійкість процесу різання.

Діапазон частот сигналу змінної складової ЕРС різання, відповідний виду зношення різального інструменту, визначається перш за все потужністю різання. Тому, вимірювання сигналу змінною складової ЕРС різання дозволить

отримати достовірну інформацію про стан різального інструменту безпосередньо в процесі обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва.

Можна зробити висновок, що між ЕРС різання і зношенням різального інструменту по задній поверхні існує взаємозв'язок, який носить складний характер. Складність полягає в тому, що цей взаємозв'язок виявляється через цілий ряд параметрів, одним з яких є величина контактної різниці потенціалів, яка залежить від різниці робіт виходу електрону матеріалів різальної частини інструменту та деталі. А величина роботи виходу електрону у свою чергу залежить від ступені пластичної деформації, дефектності кристалічної решітки, її структури дислокації, температури, окислення та інших факторів.

Висновки до розділу

1. Розгляд процесу різання матеріалів з фізичної точки зору дозволив виділити такі фізичні параметри, як електричні сигнали супроводжуючі процес різання і пов'язані з явищами тертя і зношення, які відбуваються на контактних поверхнях різального інструменту та оброблюваної деталі.

2. Досліджено основні причини генерування електричних сигналів при різанні, до яких відноситься змінна складова ЕРС різання. Показано, що пластична деформація, температура і електронна будова матеріалів інструменту і деталі визначають електричні явища при різанні металів.

3. Доведено, що між електричними явищами різними видами зношення різального інструменту існує безпосередній зв'язок.

4. Встановлено взаємозв'язок змінної складової ЕРС різання з обробленою поверхнею деталі й параметрами шорсткості.

5. Теоретично встановлено, що вимірювання в процесі різання електричних сигналів та потужності дозволить одержати достовірну інформацію про процеси, що відбуваються на контактних поверхнях різального інструменту з оброблюваною поверхнею, за допомогою розробленої нової узагальненої математичної моделі, яка описує залежність параметрів зношення

різального інструменту від потужності різання та змінної складової ЕРС різання.

ІІІ. РОЗРОБКА ДВОХПАРАМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИЛАДІВ В УМОВАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА

3.1. Розробка функціональної схеми двохпараметричної системи контролю

Проаналізувавши теоретичні дослідження оперативних засобів та методів контролю процесу обробки деталей приладів було прийняте рішення побудувати власну двохпараметричну систему контролю обробки деталей приладів. Головною перевагою цієї системи перед іншими є те, що в разі виникнення помилки при вимірюванні одного сигналу про стан різального інструменту, інший сигнал надає інформацію про стан зношення різального інструменту в умовах автоматизованого виробництва, поки не буде відновлено працездатність вимірювання першого сигналу [42].

В основу системи було покладено задачу підвищення якості обробки деталей приладів, зниження собівартості виготовлення, підвищення продуктивності праці, скорочення кількості поломок різального інструменту та браку деталей приладів, шляхом своєчасного виявлення критичного стану різального інструменту [41].

Рішення поставленої задачі досягається тим, що система контролю процесом різання, яка містить пристрій вимірювання змінної складової ЕРС різання, пристрій порівняння, виконавчий механізм, забезпечена блоками вимірювання та аналізу потужності різання що виникають у процесі обробки та безпосередньо можуть свідчити про зношення різального інструменту.

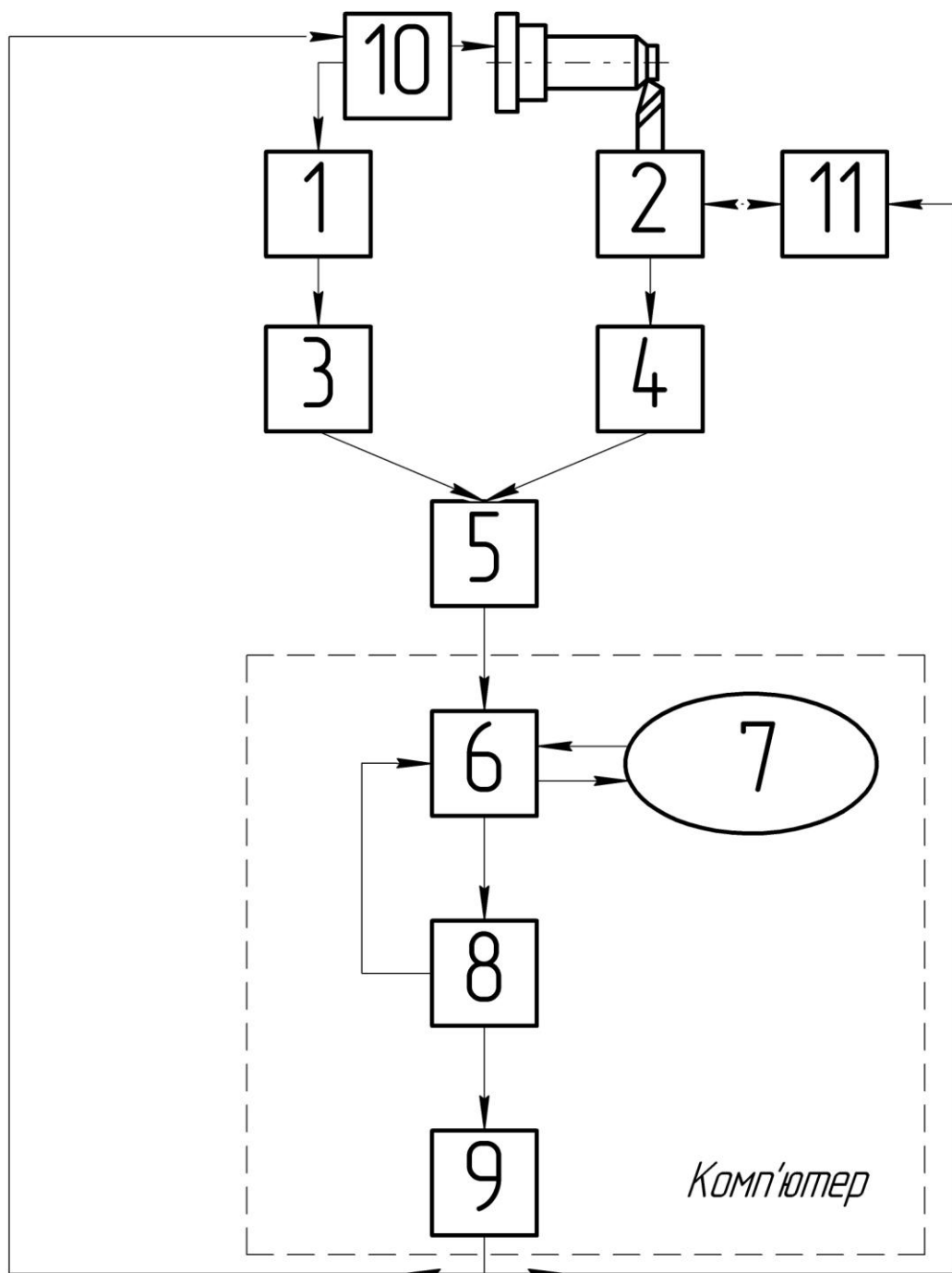


Рис. 3.1.1 Блок-схема системи контролю процесу обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва

Система контролю процесу обробки деталей приладів (рис.3.1.1) складається з датчика вимірювання потужності 1, сигнал від якого через підсилювач 3 надходить на вхід аналого-цифрового перетворювача 5 (АЦП). На цей же АЦП через підсилювач 4 надходить сигнал від пристрою вимірювання змінної складової ЕРС різання 2. Далі сигнали надходять на блок порівняння 6 отриманих значень. Цей блок, з урахуванням коригуючих параметрів, що

містяться в базі даних 7 передає інформацію про відхилення від норми на блок 8 оцінки зношення інструменту, де оцінюється інтенсивність зношення та наявне зношення інструменту на даний момент. Функцією даного блоку є опрацювання отриманої інформації та, в разі відхилення значень за межі допустимих або критичного зношення інструменту припинити обробку деталі приладу через блок 9 керування двигуном головного руху та приводом подачі, який в свою чергу керує двигуном 10 головного руху та приводом подачі 11.

3.2 Розробка алгоритму та принцип роботи контролю процесом обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва

Алгоритм функціонування контролю процесом обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва працює наступним чином (рис. 3.2.1). Пристрій вимірювання змінної складової ЕРС різання та датчик вимірювання потужності знімають значення та передають їх через підсилювачі на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Подальша обробка та аналіз вимірюваних параметрів проводиться за допомогою комп'ютера, до складу якого входить: блок порівняння отриманих значень та блок оцінки зношення інструменту, де на підставі даних про максимальне і мінімальне значення потужності різання та значення змінної складової ЕРС різання здійснюється моніторинг аварійного стану, в разі виходу значення потужності різання чи змінної складової ЕРС різання з допустимих меж на виконуючий механізм (блок керування двигуном, блок керування приводом подачі та ін.) подаються відповідні сигнали аварійної зупинки [51]. Також в цьому блоці спостерігається інтенсивність і значення зношення різального інструменту. У разі, якщо значення зношення різального інструменту вище допустимого здійснюється зупинка процесу обробки або заміна різального інструменту.



3.2.1 Алгоритм контролю процесом обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва

3.3 Розробка програмного забезпечення контролю процесу обробки деталей на основі двох параметрів

Задля того щоб провести аналіз отриманих даних, які були отримані після експериментів необхідно розробити програмне забезпечення, функціоналом якого було б обчислення зношення різального інструменту під час обробки деталей приладів за допомогою розробленої раніше комплексної математичної моделі та безпосередній контроль процесом обробки деталей приладів. Щоб забезпечити потрібний функціонал розроблено прототип програмного забезпечення (рис. 3.3.1) на мові програмування C++ з використання середовища розробки Eclipse CDT (C/C++ Development Tooling).

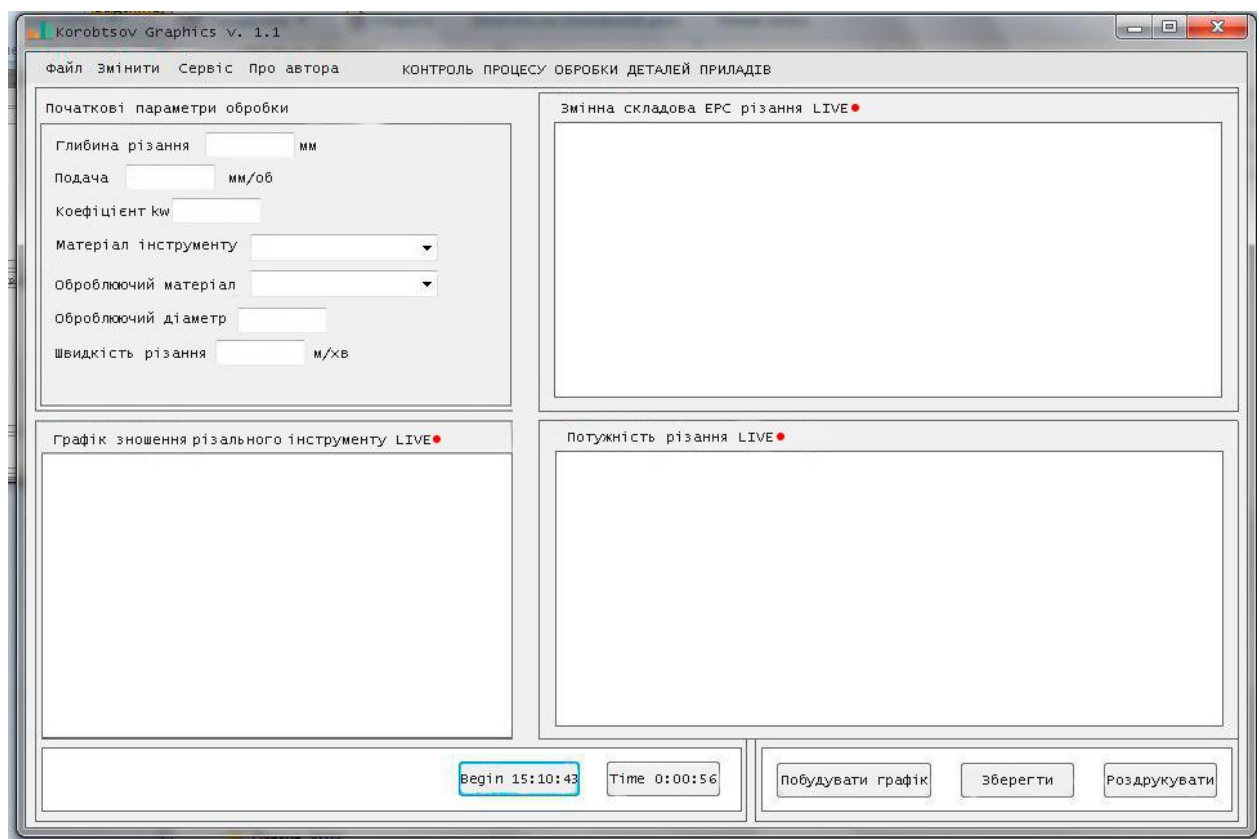
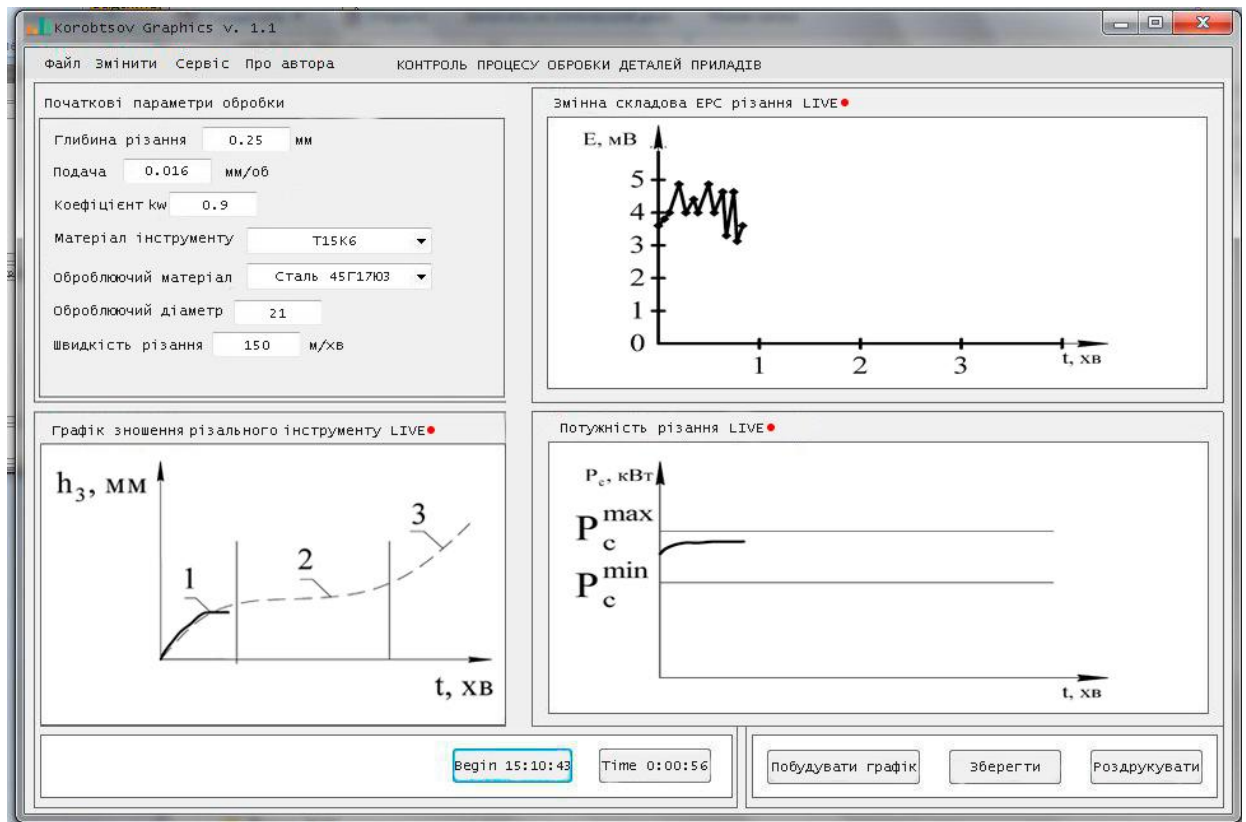


Рисунок 3.3.1. Головне вікно програмного забезпечення
«Kontrol Graphics v.1.1»

Прототип програмного забезпечення «Kontrol Graphics v.1.1» отримує значення з пристроїв вимірювання змінної складової ЕРС різання та потужності та будує графіки в режимі реально часу за допомогою розробленої

математичної моделі (2.7.3), що дозволяє «моніторити» процес різання в даний момент (рис. 3.3.2) (Код програми надано в Додатку Б).



*Рисунок 3.3.2 Робота прототипу програмного забезпечення в режимі
реального часу*

Висновки до розділу

1. Підсумовуючи переваги контролю на основі електричних сигналів перед іншими методами контролю стану об'єктів, варто виділити оперативність проведення самого контролю, високий економічний ефект, що досягає шляхом завчасного виявлення несправностей систем, економію часу й засобів на ліквідацію можливої аварії, можливість місцевого ремонту.
2. Контроль зношення різального інструменту на основі визначення ЕРС різання – один з найбільш швидких та точних методів.
3. Двохпараметрична система контролю різального інструменту на основі потужності та електричних сигналів показала високу експлуатаційну надійність і точність, що дозволяє ефективно використати їх у пристроях автоматичного керування процесом обробки матеріалів на верстатах з ЧПК, в умовах автоматизованого виробництва.

4. Побудована двохпараметрична система контролю є високонадійною і високоточною системою, що служить для отримання деталей необхідної якості, перешкоджає утворенню бракованої продукції, а також продовжує термін експлуатації різального інструменту.

5. З використанням структурної схеми та алгоритму роботи двохпараметричної системи контролю процесом обробки деталей приладів, комплексної математичної моделі розроблено прототип програмного забезпечення з використанням мови програмування C++ з використання інтегрованого середовища Eclipse CDT (C/C++ Development Tooling). Прототип програмного забезпечення “Kontrol Graphics v. 1.1” будує графіки залежності змінної складової ЕРС різання та потужності від часу, та за допомогою комплексної математичної моделі обчислює зношення різального інструменту, в режимі реального часу. Також прототип програмного забезпечення в разі необхідності зупиняє процес обробки деталей приладів коли реєструється критичне зношення різального інструменту або ж поломка різального інструменту.

IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА

4.1 Методика проведення експериментальних досліджень

На основі проведеного аналізу розроблена система контролю обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва на верстатах з ЧПК, що дозволяє реєструвати критичне зношення та поломку різального інструменту.

Тому, був розроблений пристрій для вимірювання ЕРС різання без застосування струмознімача, ізоляції інструмента й деталі від маси верстата, що дасть можливість широко використовувати його у виробничих умовах.

Розроблений пристрій складається з магнітного торроїдального феритового сердечника, встановленого безпосередньо в різцетримачі і охоплює державку різального інструменту. А котушка обмотки встановлена на іншому кінці магнітного сердечника. Виникаюча в процесі різання ЕРС викликає протікання в обробній системі змінного струму, при цьому обробну систему можна представити у вигляді одного витка первинної обмотки. Змінний струм, що протікає по різальному інструменті, наводить змінний магнітний потік у сердечнику. При вимірюванні використовують режим холостого ходу трансформатора струму. У цьому режимі магнітний потік збільшується в наслідок відсутності струмів розмагнічування, що у свою чергу різко збільшує ЕРС у вторинній обмотці. Електрорушійна сила, що виникає у вторинній обмотці, залежить від конструктивних параметрів сердечника, числа витків вторинної обмотки, сили струму, що протікає по різцю, і частоти зміни магнітного потоку. Величина частоти зміни магнітного потоку пропорційна частоті зміни струму й відповідно ЕРС різання.

При проведенні експериментів режими різання змінювалися в наступних межах: швидкість різання V від 2 до 480 м/хв, подача S від 0,06 до 0,3 мм/об,

глибина різання t від 0,3 до 1 мм, геометрія різальної частини інструменту: $\gamma = 3^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$; $\lambda = 0^\circ$.

Використовувалися спеціальні токарні прохідні різці з механічно закріпленими різальними пластинками ВК8. Оброблюваний матеріал - Сталь 45.

Зношення по задній грані вимірювалось за допомогою інструментального мікроскопа УМІ N5807 з ціною поділки 0,01 мм.

Експериментальні дослідження, які стосуються вимірювання характеристик при холостому ході, проводилися на верстатах моделі 1К62ПУ, 1А616.

Для дослідження правильності роботи системи, що будувалася у розділі II було проведено наступний експеримент: заготовка оброблялася при різних швидкостях різання зі сталою подачею та глибиною різання. Після кожної обробки вимірювалася шорсткість отриманої поверхні за допомогою приладу для вимірювання шорсткості поверхні MarSurf PS1, загальний вид якого представлений на Рис. 4.1.2. Прилад складається з вимірюючого щупа, який дозволяє виконувати вимірювання в будь-якому положенні без потреби в регулюванні протягом установки. Максимальний діапазон вимірювання - 350 мкм (від -200 мкм до +150 мкм).

Завдяки широкому діапазону, MarSurf PS1 має широке розмаїття застосувань, а саме:

- для деталей типу колінчастих або розподільних валів, які вимірюються в осьовому напрямку, можливе застосування додаткового адаптера для поперечного вимірювання;
- додатковий V-подібний кронштейн дозволяє проводити вимірювання на плоских і циліндричних поверхнях будь-яких деталей.



Рис.4.1.2. Прилад для вимірювання шорсткості поверхні MarSurf PS1

Дослідження проводили, використовуючи вал Сталь 45. Базова довжина вимірювання складала 0,8 мм, діаметр заготовки – 30 мм.

При вимірюванні зразка ($L_t = 5.60$ мм; $L_c = 0.80$ мм; $n = 5$; $A = 0.50$ мм; $B = 2.50$ мм, де L_t – вимірювальна довжина, L_c – довжина відрізка, n – число вибірки довжини, A – оператор максимальної довжини шорсткості, B – оператор максимальної довжини хвилястості), отримали такі результати:

- $R_a = 5.183$ мкм;
- $R_z = 25.8$ мкм;
- $R_x = 65.5$ мкм.

Провівши дане дослідження, отримали такий вид профілограми (Рис. 4.1.3):

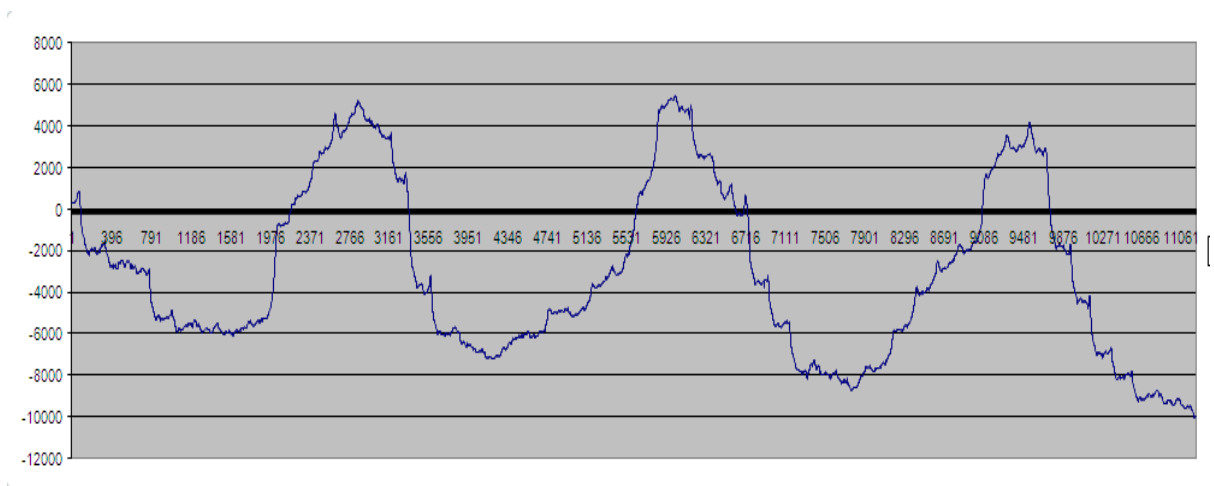


Рис. 4.1.3. Профілограма зразка Сталь 45

Загалом було проведено 8 вимірювань і побудовано графік залежності зміни шорсткості від швидкості. Графік було порівняно з теоретичним (Рис. 4.1.4.). На основі порівняння було зроблено висновок, що побудована система працює вірно і придатна для ряду наступних теоретичних досліджень.

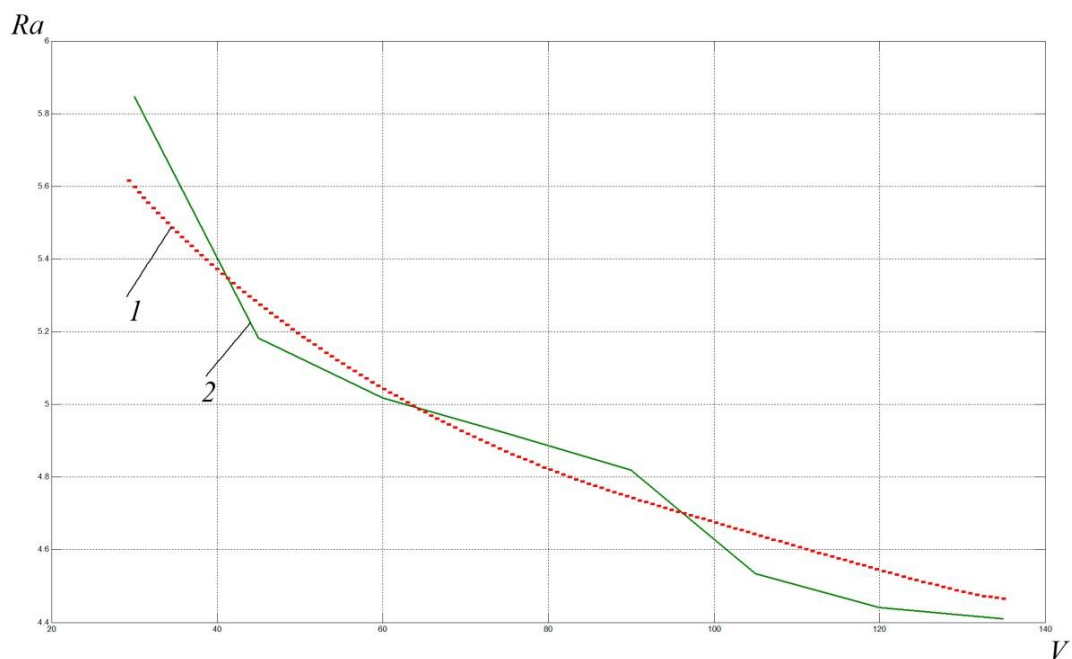


Рис. 4.1.4. Залежність шорсткості від швидкості різання. 1 – теоретична, 2 – експериментальна

На основі математичної моделі було побудовано наступні залежності: залежність шорсткості від подачі – Рис. 4.1.5, та залежність шорсткості від глибини різання – Рис 4.1.6.

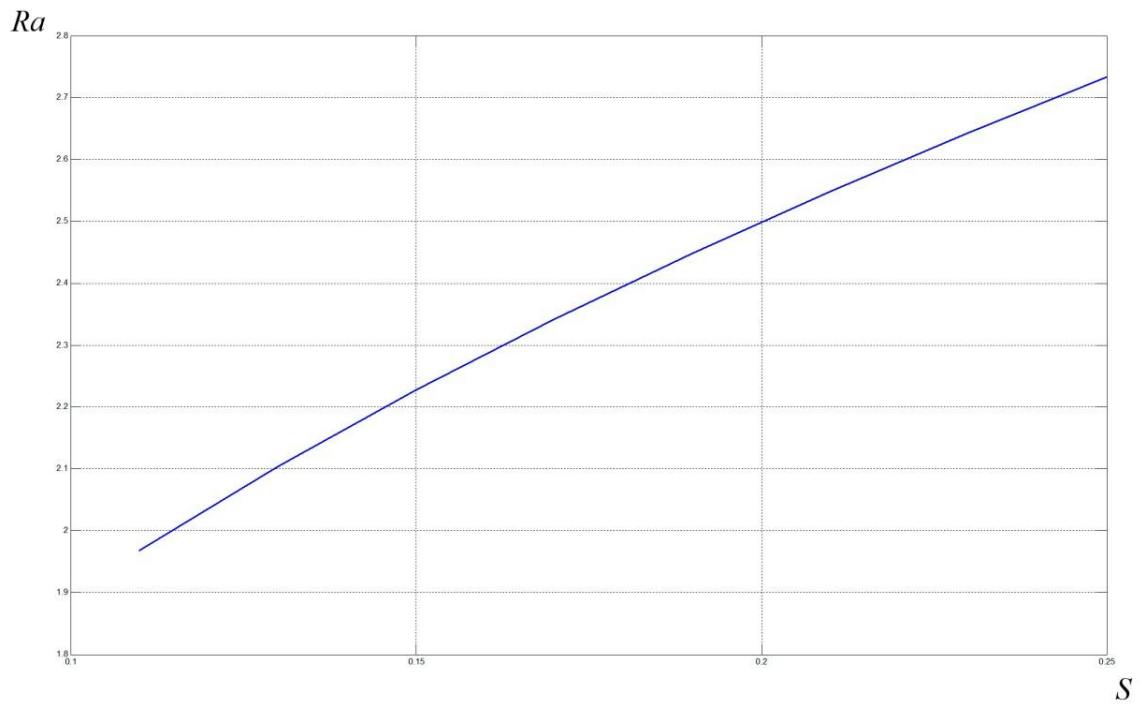


Рис. 4.1.5. Залежність шорсткості від подачі

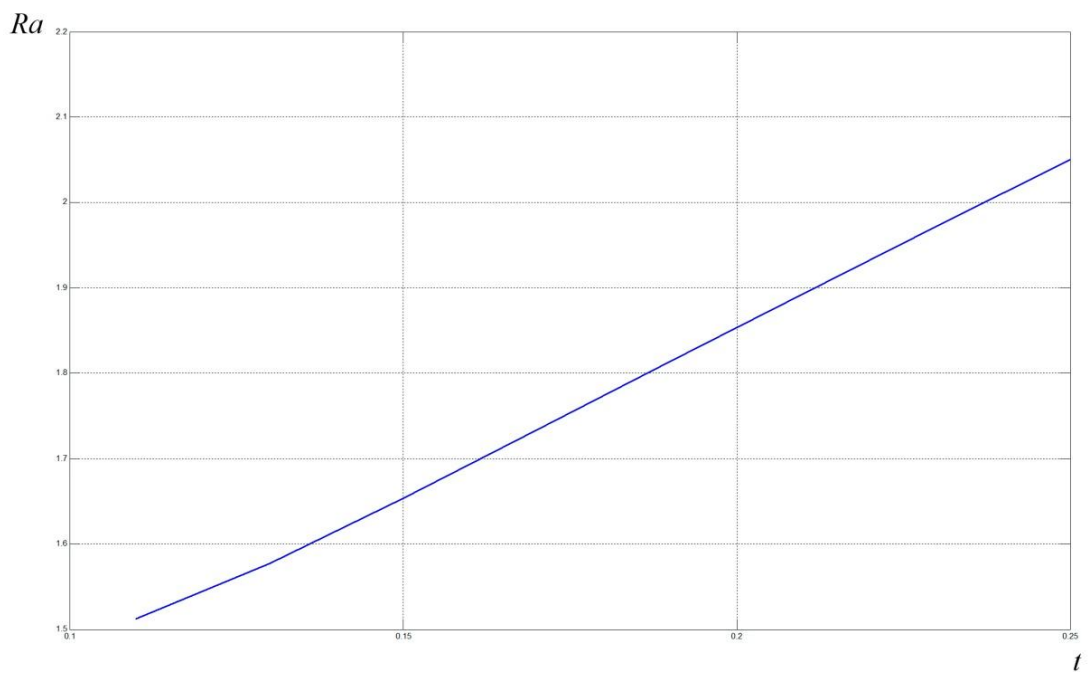


Рис. 4.1.6. Залежність шорсткості від глибини різання

Аналізуючи отримані залежності можна зробити висновок, що шорсткість у більшій мірі залежить від швидкості різання та у меншій від подачі та глибини, при чому, залежність від швидкості – прямо обернено

пропорційна, а від подачі та від глибини – пропорційна. Це означає, що чим вища швидкість, тим менша шорсткість отриманої поверхні.

Найбільшу ефективність від контролю процесу обробки деталей приладів в автоматизованому виробництві можна отримати тоді, коли контроль буде оснований на інформації, яка безпосередньо пов'язана з фізичними процесами, які відбуваються на контактуючих поверхнях різального інструменту. З цієї точки зору електричні сигнали, що генерують при різанні, несуть інформацію про фізичні процеси в зоні різання. Крім того електричні сигнали не потребують підсилень, перетворень і забезпечують надійність отримання інформації.

Виникаюча в процесі різання електрорушійна сила складається із змінної і постійної складової. Зміна складова характеризує коливання енергії на контактних поверхнях і викликає протікання в обробляючій системі змінного струму.

Вимірювання змінної складової ЕРС різання являється в наш час доволі складною і до кінця ще не вирішеною задачею. Як правило вимірюють змінну складову ЕРС різання, використовуючи струмознімальний пристрій і ізолюючи різальний інструмент і деталь від маси верстату, що знижує універсальність обладнання і призводить до технічних труднощів реалізації. Використання цього методу потребує ретельного дослідження струмознімального пристрою в момент всього періоду роботи. Це викликано тим, що струмознімальник вносить перешкоди в канал вимірювання змінної складової ЕРС різання, а також виступає в якості фільтра, що згладжує високочастотні гармоніки сигналу.

Можна зробити висновок, що існуючі до цього часу пристрої контролю стану інструменту на основі змінної складової ЕРС різання в силу вищеперерахованих недоліків не знаходять широкого використання на виробництві. Тому була поставлена задача розробки для вимірювання змінної складової ЕРС різання без використання струмознімального пристрою, ізоляції інструмента і деталі від маси верстату, що дасть можливість широко

використовувати його в промислових умовах. Досліди показали, що застосування методу трансформатора струму дозволить розв'язати цю задачу.

Пристрій для вимірювання змінної складової ЕРС різання можна представити в наступному вигляді (Рис. 4.1.7). Магнітний тороїдальний феритовий сердечник 1 встановлюють на ізоляційні прокладки 2 які прикріплені до державки 3 різального інструменту. Котушка обмотки 4 встановлена на іншому кінці магнітного сердечника. Можливі також варіанти вбудовування пристрою безпосередньо в різцетримач. На рис. 4.1.8 представлена принципова схема пристрою, що дозволяє розглянути його роботу. В процесі різання виникає змінна складова ЕРС, яка викликає протікання в обробній системі змінного струму, при цьому обробну систему можна представити у вигляді одного витка первинної обмотки. Змінний струм протікає по різальному інструменту та наводить змінний магнітний потік Φ в осерді I . При вимірюванні використовуємо режим холостого ходу трансформатора струму.

В цьому режимі магнітний потік Φ збільшується внаслідок відсутності струмів розмагнічування, що в свою чергу різко збільшує ЕРС E_ϕ у вторинній обмотці. Магніторушійна сила в первинній обмотці виражається в наступному вигляді:

$$F_m = I_1 \cdot W_1 \quad (4.1.1)$$

де I_1 - струм, що протікає по різального інструмента,

W_1 - число витків в первинній обмотці ($W_1=I$).

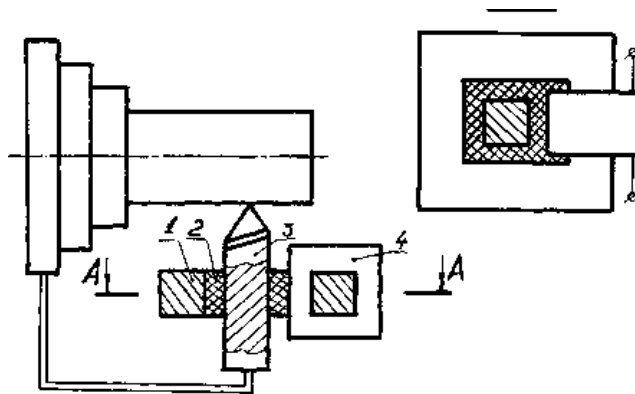


Рис.4.1.7 Пристрій для вимірювання змінної складової ЕРС. 1 - феритовий сердечник, 2 - ізоляційні прокладки, 3 - державка різального інструменту, 4 - котушка.

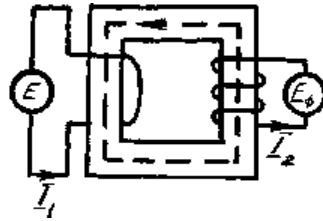


Рис. 4.1.8 Принципова схема роботи пристрою для вимірювання змінної складової ЕРС різання.

Магнітний опір сердечника R_m визначається за формулою

$$R_m = \frac{lm}{\mu \cdot S_m}, \quad (4.1.2)$$

де lm - довжина ділянки магнітного ланцюга; S_m - площа перерізу магнітопроводу; μ - магнітна проникність матеріалу сердечника.

А магнітний потік Φ_m в осерді, в свою чергу, дорівнює

$$\Phi_m \frac{F_m}{R_m} = \frac{I_1 w_1 S_m \mu}{l_m}, \quad (4.1.3)$$

ЕРС різання, що виникає у вторинній обмотці

$$E_\phi = \frac{\partial \Phi_m}{\partial \tau} W_2, \quad (4.1.4)$$

де Φ_m - число витків у вторинній обмотці.

Підставляючи (4.1.1) (4.1.2) (4.1.3) в (4.1.4) отримаємо

$$E_\phi = 2\pi W_2 \mu f_m \cdot \frac{S_m}{l_m} \cdot I_1, \quad (4.1.5)$$

де f_m - частота зміни магнітного потоку.

Аналіз (4.1.5) показує, що електрорушійна сила E_ϕ , що виникає у вторинній обмотці залежить, з одного боку, від конструктивних параметрів сердечника і числа витків вторинної обмотки, а з іншого боку від сили струму, що протікає по різцю, і частоти зміни магнітного потоку. Величина частоти

зміни магнітного потоку пропорційна частоті зміни струму і відповідно ЕРС різання.

Отже, вимірювання ЕРС у вторинній обмотці дозволить виміряти змінну складову ЕРС різання.

Вимірювання потужності різання має декілька варіантів реалізації. Можна виділити три найбільш прості в реалізації способи вимірювання потужності різання.

Перший спосіб полягає в безпосередньому вимірюванні напруги та сили струму, що проходить через електродвигун за допомогою вольтметра та амперметра. Але даний спосіб має декілька недоліків, одними із яких є часткове втручання в електричну схему двигуна та підвищена небезпека під час виконання вимірювань. Даний спосіб можна віднести до лабораторного і непридатного до використання в умовах автоматизованого виробництва.

Другий спосіб ґрунтується на використанні сучасного реле контролю потужності електродвигуна (Рис.4.1.7) що дозволяє з достатньою частотою та в достатньому інтервалі вимірювати активну потужність електродвигуна. В табл. 4.1.1 наведено технічні характеристики зазначеного реле, а на рис. 4.1.8 наведено схему підключення даного реле в схему електродвигуна.



Рисунок 4.1.7 – Реле контролю активної потужності електродвигуна

Таблиця 4.1.1 – Технічні характеристики

Параметр	Значення
Вимірювальна величина	Споживана активна потужність
Діапазон вимірювання	0,5...4 кВт
Максимальний комутований струм	5А
Періодичність вимірювань	0,01...50 с
Робоча температура	Від -25 до +55 °С

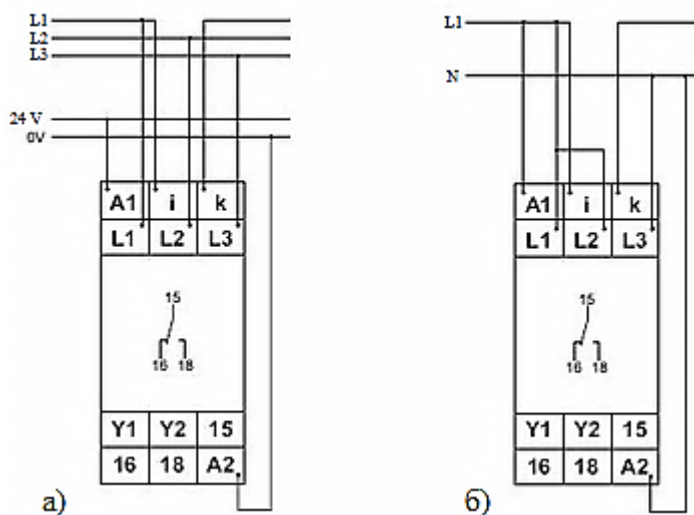


Рисунок 4.1.8 – Схема підключення:

а – до мережі 3~400В з модулем живлення 24В; б - до мережі 1~230В з модулем живлення 230В

Використання такого реле є безумовно найкращим варіантом для вимірювання активної потужності електродвигуна.

Третій спосіб реалізується за допомогою вбудованого реле контролю потужності електродвигуна, які зараз встановлюються майже на всі верстати.

4.2. Залежність величини зношення різального інструменту від змінної складової ЕРС різання та потужності

Проведені дослідження показали, що при вимірюванні ЕРС різання виникають похибки, і тому у виробничих умовах ускладнений контроль зношення різального інструменту по ЕРС різання безпосередньо в процесі обробки.

Проте початкові значення величини ЕРС різання, тобто ті значення, які вимірювальний прилад зафіксував в перші секунди після початку різання, коли відсутня одна з перешкод вимірюваного сигналу — контактна термо-ЕРС, несуть інформацію про стійкість різального інструменту.

Таким чином по початкових значеннях змінної складової ЕРС різання можливе розбраковування різальних пластин по стійкості. Початкові значення ЕРС різання характеризують фізико-хімічні взаємодії в зоні контакту інструменту з деталлю. Чим менше початкові значення ЕРС різання, тим менш інтенсивно проходять процеси тертя і зношення в контактних зонах і відповідно більше стійкість різального інструменту [53]. Разом з тим, як показали представлені вище експериментальні дослідження, початкові значення ЕРС різання залежать не тільки від стійкості різального інструменту, але і від режимів різання, інструментального і оброблюваного матеріалів. Для усунення цього недоліку був запропонований спосіб визначення зношення інструменту, який полягає у вимірюванні величини відношення початкових значень, ЕРС зафіксованих в перші секунди від початку різання, до значень ЕРС після декількох хвилин різання. При цьому величина відношення визначається тільки зношенням різального інструменту і не залежить від металорізального верстату, на якому проводиться обробка, способу кріплення різальної пластинки, матеріалів інструменту і деталі, режимів різання, геометрії різальної частини інструменту і інших параметрів.

Також можливим шляхом визначення зношення інструменту можуть слугувати різноманітні методи математичного моделювання, які зараз все більше використовуються для моделювання складних технологічних процесів.

Одним із найбільш привабливих методів для прогнозування зношення різального інструменту, завдяки своїй універсальності і точності, являється нечіткий метод групового врахування аргументів (МГВА). Під час проведення дослідів стала очевидною така особливість, як напрямок вимірювання опору підшипників, тобто в якому напрямку проводиться вимірювання, від 12,5 до 2000 об/хв., чи навпаки. Графічно дана особливість зображена на рис. 4.2.1.

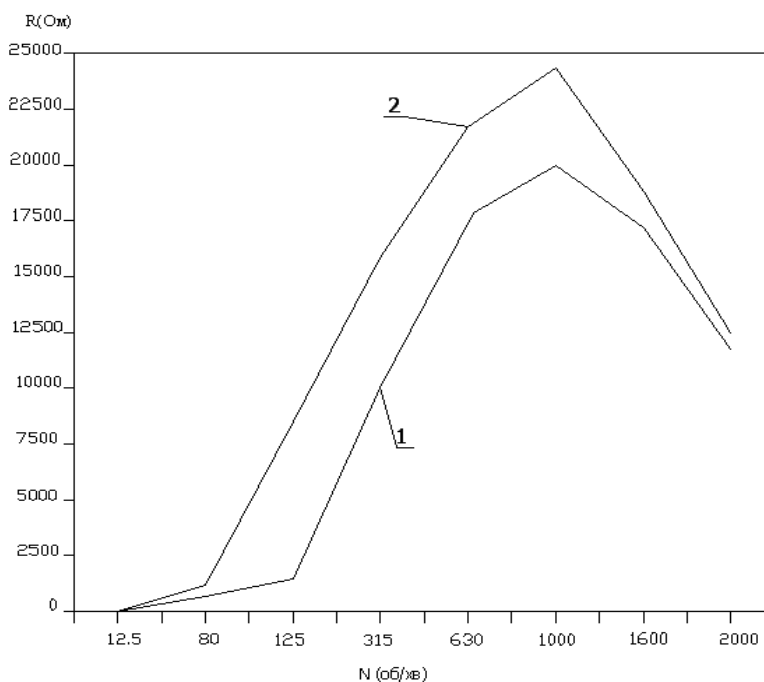


Рисунок 4.2.1 Залежність опору R від кількості обертів n : 1 — напрямок вимірювання від 12,5 до 2000 об/хв.; 2 — напрямок вимірювання від 2000 до 12,5 об/хв. (матеріал Д16, інструмент ВК8, подача $S = 0,06$ мм/об, глибина різання $t = 0,5$ мм, діаметр заготовки $d = 77$ мм).

Висновки до розділу

1. Вимірювання значення складової змінної ЕРС різання із зони різання здійснювалось за допомогою спеціально розроблених пристроїв, встановлених безпосередньо на устаткуванні верстату.
2. Експериментально встановлено, що при зношенні різального інструменту змінна складова ЕРС різання зростає.

3. Розуміння залежностей шорсткості деталі від режимів різання, а також від зношення інструменту дає нам можливість побудови високоточної системи корекції для отримання деталей необхідної якості.

V. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «КОНТРОЛЬ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИЛАДІВ В УМОВАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА»

5.1 Опис ідеї проекту

Розглянувши в попередніх розділах вплив електрорушійної сили та потужності на зношення різального інструменту було написано програму контролю процесу обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва. Метою цього розділу є аналіз стартап-проекту, результатом якого є визначення змоги та доцільності кінцевого продукту виходу на ринок та змоги достойно конкурувати з продуктами, які вже є на ринку і зайняли в ньому деяку нішу.

У таблиці 5.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Технологія вимірювання електрорушійної сили (ЕРС) різання без використання струмознімача та без ізоляції маси верстату від інструменту та деталі, яка дозволяє розширити використання цього пристрою у виробничих умовах.	1. Контроль процесу обробки деталей.	Широке застосування для контролю процесу обробки деталей.
	2. Зниження шорсткості оброблювальної деталі.	Керуючи величиною ЕДС різання можна знизити шорсткість.
	3. Приладобудування.	Виявлення зношення інструменту в режимі реального часу.

Отже, пропонується технологія вимірювання ЕРС без використання струмознімача для контролю процесу обробки деталей, яка дозволяє розширити діапазон використання за рахунок простоти реалізації, а також дозволяє знижувати шорсткість оброблювальної поверхні деталі.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.2).

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характерис- тики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтраль на сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	<i>Renishaw</i>	<i>Haascnc</i>	<i>Biesse</i>			
1.	Торгівельна марка	немає	Є	є	є	+		
2.	Економічність	Середня ціна	Середня ціна	Висока ціна	Низька ціна		+	
3.	Патенти на продукти	є	немає	є	немає			+
4.	Доцільність масового використання	Широке використання	Вузьке використання	Середнє використання	Вузьке використання			+

Оцінивши характеристики та ідеї товару легко зробити висновки, що продукт є конкурентоспроможним, тому що за середню ціну на ринку споживач отримує простіший у використанні товар і, що є особливим, захищений від копіювання та розповсюдження за рахунок патенту на винахід.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології (методики розрахунків), за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту. Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1	Використати пристрій вимірювання ЕРС різання без використання струмознімача	Виготовлення пристрою вимірювання ЕРС різання	Необхідно розробити	Не доступні
2	Використати магнітний торроїдальний феритовий сердечник	Придбати магнітний торроїдальний феритовий сердечник	Наявні	Доступні
3	Використати котушку обмотки	Придбати котушку обмотки	Наявні	Доступні
4	Використати ПЗ керування контролю процесу обробки деталей приладів	Розробка ПЗ керування контролю процесу обробки деталей приладів	Необхідно розробити	Не доступні

Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок, що технологічна реалізація проекту є можливою за умови того, що буде розроблено пристрій

вимірювання ЕРС різання без використання струмознімача та розробки ПЗ керування контролю процесу обробки деталей приладів.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Це дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 5.4).

Таблиця 5.1. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	6
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	7800
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростаюча
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Більша конкурентоспроможність Європейських фірм
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	40%

За попереднім оцінюванням ринок є привабливим для входження, тому що ринок є достатньо рентабельним та конкурентоспроможним, що говорить про доцільність спроби виходу на ринок, хоча на ньому вже існують вітчизняні і іноземні фірми, які працюють багато років і роблять продукцію хорошої

якості, але за рахунок нової технології і переваг, які вона надає продукт є конкурентоспроможними.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.5).

Таблиця 5.2. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Підвищення достовірності контролю процесу обробки деталей приладів	Підприємства, які виготовляють різноманітні деталі для приладів	Забезпечення якості та надійності виготовлених деталей, за рахунок контролю процесу обробки в режимі реального часу.	Висока точність, надійність, довговічність, простота експлуатації.

Отже, підвищенням достовірності контролю процесу обробки деталей приладів цільова аудиторія буде задоволена у свої потребах та вимогах.

При застосуванні даної технології існують певні загрози. Для попередження таких ситуацій необхідно якісне обладнання, а також працювати з такими програмами повинні висококваліфіковані фахівці. Також, повинно своєчасне технічне обслуговування даного продукту (таблиця 5.6).

Таблиця 5.3. Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Конкуренція	Збільшення варіацій асортименту конкурентами	Якісна реклама власної продукції та доцільні факти та докази якості власної продукції
2	Старіння	Вдосконалення продукту конкурентом	Покращення власного продукту та якісна реклама
3	Відсутність попиту на продукції	Занепокоєння користувачами переходу на нову продукцію	Розширення функціоналу приладу за рахунок доручення інвесторів
4.	Постачання	Проблема з фірмами постачальниками	Зміна політики розповсюдження продукту
5.	Технічний	Не розуміння методики в зв'язку з некваліфікованими кадрами	Спрощення алгоритмів методики або впровадження постійної підтримки кваліфікованих техніків

В таблиці 5.6 ми визначили фактори загроз які перешкоджають ринковому впровадженню нашого проекту, а також можливу реакцію на фактор щоб звести до мінімуму його вплив. Основними загрозами беззаперечно являються конкуренція та відсутність попиту, представлені можливі реакції майбутньої компанії на той чи інший фактор загрози.

Але поряд із деякими загрозами існують і певні можливості (таблиця 5.7).

Таблиця 5.4. Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Попит на якісний продукт	Потреба підвищення точності вимірювання ЕРС різання	Спрощення існуючих схем точності вимірювання ЕРС різання та впровадження масштабного виробництва
2	Поява нової роздрібної мережі	Задати темп для появи нової роздрібної мережі	Бути лідером в співвідношенні ціна-якість в новій роздрібній мережі
3.	Політико-правові	Може вплинути на купівлю/продаж товару.	Зміна напрямків імпорту
4	Економічні	Політика протекціонізму; підтримка інноваційного виробництва.	Підвищення/пониження ціни на продукт; зменшення податкового тиску
5	Науково-технічні	Зміниться технологія виготовлення товару	Впровадить технологію і змінить вартість товару

В таблиці 5.7 ми визначили фактори можливостей які сприяють ринковому впровадженню нашого проекту, головною стратегією та можливими реакціями компанії є досить рішучі дії, які, в деяких випадках, можливо, є ризиком, але на конкурентному ринку стратегія лідера є досить хорошою конкурентною поведінкою.

Таблиця 5.5. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Олігополія	В галузі домінує декілька конкуруючих компаній	Спроба задати темп іншим компаніям
2. Національний	Конкуренція фірм на міжнародному рівні	Поставка через дистриб'юторів якісної продукцію в інші країни світу
3. Внутрішньогалузева	Виробники виготовляють продукти, які задовольняють одну потребу	Визначення чіткого стандарту співвідношення ціна-якість
4. Товарно-родова	Різноманітні товари для задоволення конкретної потреби	Розробка нових та вдосконалення існуючих товарів, доповнень для використання їх в комплексі
5. Цінова	Використання ціни як засіб кращих умов збуту	Пояснення користувачу чому така ціна, без математичних формул.
6. Марочна	Вказує, яке підприємство відповідальне за готовий продукт	Створення власної марки, а згодом створення власного ім'я-бренду

В даній таблиці ми проаналізували ринок збуту нашого продукту і визначили загальні риси конкуренції на ньому.

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі.

Таблиця 5.6. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари- замінники</i>
	<i>Renishaw, Haascnc, Biesse.</i>	<i>Конкурентоспроможний асортимент у конкурентів.</i>	<i>Значення розміру поставок</i>	<i>Розмір закупівель, торгівельні знаки</i>	<i>Ціна, лояльність споживачів</i>
Висновки:	Інтенсивність конкуренції достатньо висока. Більшість фірм отримують великий прибуток.	Присутні можливості входу в ринок за рахунок інвестицій та впровадження нових технологій.	Немає особливих умов для виходу на ринок.	Клієнти диктують умови роботи на ринку. Вимоги до габаритних і метрологічних характеристик продукту.	Обмежень для роботи на ринку немає.

Отже, конкурентоспроможність на ринку повинна бути на досить хорошому рівні, на що вказують визначені характеристики прояви тієї чи іншої особливості конкурентного середовища в цілому.

Таким чином в межах структурного підходу до аналізу конкуренції тип конкуренції – олігополістична конкуренція.

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Поки проект не впроваджено в життя, це важко зробити точно, можна дати лише попередню оцінку конкурентоспроможності.

Таблиця 5.7. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1	Ресурсний	Менші затрати ресурсів на одиницю продукції
2	Ціновий	Прийнятний рівень і динаміка цін на виготовлену продукцію
3	Широке застосування	Не великогабаритний пристрій, який легко використовувати
4	Точність вимірювань	Більш точні показники ЕРС різання

В таблиці 5.10 на основі аналізу проведеного в таблиці 5.9 визначили та обґрунтували фактори конкурентоспроможності нашого проекту. Визначено, що кожен фактор конкурентоспроможності є значущим в порівнянні з конкурентними проектами, що робить даний проект особливим та рентабельним для реалізації.

Таблиця 5.8. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Нульові напруження»

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Бали 1-20</i>	<i>Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з КСК</i>						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Ресурсний	19						+	
2	Ціновий	17				+			
3	Широке застосування	20							+
4	Точність вимірювань	18							+
5	Новизна	17					+		
1	Ресурсний	19						+	

Аналіз сильних та слабких сторін показує, що даний проект є конкурентоспроможним в порівнянні з товарами конкурентів, навіть не маючи великої розбіжності в ціні.

Таблиця 5.9. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: <ul style="list-style-type: none"> - ресурсна; - цінова; - широке застосування; - точність вимірювань; - патенти на продукти; - доцільність масового використання. 	Слабкі сторони: <ul style="list-style-type: none"> - торгівельна марка; - економічність.
Можливості: <ul style="list-style-type: none"> - попит на якісний продукт; - поява нової роздрібної мережі; - політико-правова діяльність; - економічна діяльність; - науково-технічна діяльність. 	Загрози: <ul style="list-style-type: none"> - конкуренція; - старіння; - відсутність попиту на продукцію; - постачання; - технічна загроза.

В таблиці 5.12 проводимо перелік сильних та слабких сторін проект. Даний аналіз розглядає сильні та слабкі сторони, а також можливості проекту та варіанти загроз. Сильних сторін достатньо щоб виходити на ринок, але присутня і слабка сторона, яка сприяє виникненню ризику.

На основі SWOT-аналізу розробляємо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів.

Таблиця 5.10. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Впровадження нової технології виготовлення пристрою вимірювання ЕРС різання	висока	8 міс.
2	Модернізація попередніх версій пристрою	середній	6 міс.

Орієнтовний комплекс заходів та ймовірність отримання фінансування на ці заходи є досить вірогідними і реалізуються за не великий проміжок часу, що можна використовувати як інструмент альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту. Отже обираємо стратегію компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 5.11. Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ n/n</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Держпідприємства	Готові	Високий попит	Висока	Середня
2	Приватні підприємства	Готові	Високий попит	Низька	Просто
3	Зарубіжні підприємства	Не готові	Низький попит	Висока	Тяжко
Які цільові групи обрано: приватні підприємства. Використовується стратегія диференційованого маркетингу.					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів цільовою групою потенційних споживачів було обрано приватні підприємства, так як вони є найбільш платоспроможними, та інтенсивність конкуренції є найменшою з потенційних споживачів, що дає можливість для хорошого старту в цьому сегменті, а згодом виходу на більш масштабний ринок.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку.

Таблиця 5.12. Визначення базової стратегії розвитку

<i>№ n/n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку*</i>
1	Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Стратегія вибіркового розподілу	Більш широке використання Краща точність Середня ціна на ринку	Стратегія спеціалізації

Було обрано стратегію спеціалізації, щоб задовольнити потребу вибраного цільового сегменту краще, ніж конкуренти.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16).

Таблиця 5.13. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ n/n</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
1	Проект не є «першопрохідцем»	Компанія буде забирати існуючих у конкурентів	Не буде копіювати основні характеристики товару конкурента	Стратегія лідера

На початкову стадію розвитку компанії було обрано стратегію лідера, як стратегію конкурентної поведінки, тому що майбутня компанія буде займатися

реалізацією заходів по формуванню попиту, оборонну або наступальну стратегію, застосовуючи демаркетинг або диверсифікацію як основу стратегії лідера в конкурентній поведінці.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект.

Таблиця 5.14. Визначення стратегії позиціонування

<i>№ п/п</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувані комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1	Широке застосування Висока точність	Стратегія спеціалізації	Найкраще співвідношення ціна- якість на ринку	Точність Функціональність Легкість використання

Обрано ключові асоціації, які мають сформувані комплексну позицію власного проекту і базову стратегію розвитку, в якій за основу буде взято стратегію спеціалізації, яка передбачає концентрацію на потребах одного цільового сегменту краще, ніж конкуренти та з не великим опором на стратегію диференціації, роблячи товар відмінним від інших, який є загальноновимогливим і широкозастосовуваним.

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 5.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.15. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	1. Контроль процесу обробки деталей	Широке застосування для контролю процесу обробки деталей	Надійність, простота використання.
2	2. Зниження шорсткості оброблювальної деталі	Керуючи величиною ЕДС різання можна знизити шорсткість	Інновація, відсутність альтернативи.

Ключовими перевагами перед конкурентами є надійність та простота використання, що є відмінністю від конкурентів і дозволяє більш легко виходити на ринок, а також мати власну особливість продукту.

Таблиця 5.16. Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Програма для розрахунку напруження в різальному інструменті Можна виділити наступні вигоди використання: <ul style="list-style-type: none"> - спрощення процесу обробки; - підвищення швидкості діагностики та контролю; - зменшення шорсткості оброблюваної деталі; - підвищена надійність і довговічність інструменту. 		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Широке поширення	М	Вр/Тл
	2. Економічність	Нм	Вр
	3. Технологічність	М	Вр/Тх
	4. Призначення	Нм	Тх
	5. Безпека	М	Тх
	Якість: Відповідає нормам ДСТУ ГОСТ 8.429:2009 ГСИ. «Вольтметри електронні аналогові імпульсні».		
III. Товар із підкріпленням	Пакування: звичайна картонна коробка з назвою торгівельної марки, назвою продукту і технічними характеристиками		
	Марка: назва організації-розробника + «Контроль за допомогою ЕРС»		
	Розповсюдження реклами		
III. Товар із підкріпленням	Акція, яка передбачає придбати кілька десятків товарів за оптовою ціною		
	За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: захист інтелектуальної власності, патент на винахід.		

Трирівнева маркетингова модель товару уточнює ідею та фізичні складові і підтверджує, що проект буде захищено від копіювання за допомогою патенту на винахід та захисту інтелектуальної власності, якість відповідає нормам ДСТУ.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 5.20).

Таблиця 5.17. Визначення меж встановлення ціни

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари- замінники</i>	<i>Рівень цін на товари- аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1	5800 грн	6200 грн	Високий	6000 – 7800 грн

Цінова політика компанії є досить високою в загальному, але середньою в своєму напрямку використання серед конкурентів, але рівень доходів цільової групи споживачів є досить високим, що дає можливість придбати товар/послугу в разі необхідності.

Таблиця 5.18. Формування системи збуту

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Звичайна купівля з деяким змінами, або модифікована закупівля. Вона передбачає придбання дещо змінених товарів (послуг), або зміну ціни на товар (послугу), або зміну кількості постачання.	Дистриб'ютор виконує такі основні функції: транспортування, складання, зберігання, доробка, просування до оптових і роздрібних торгових ланок.	Однорівневий канал збуту	Продаж товару посереднику але і використання інших способів прямого продажу : - Торгівля через дистриб'юторів - Посилкова торгівля - Торгівля в роздріб. - Оптова торгівля.

Система збуту через посередників є найбільш оптимальною системою збуту в цьому випадку, в якій основний акцент опирається на торгівлю через дистриб'юторів і, безпосередньо, користувачу через посилкову торгівлю, оптову або в роздріб.

Таблиця 5.19. Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1	Перегляд інформаційних ресурсів із потрібним якісним товаром за доступною ціною	Інтернет ресурси, каталоги інструментів, виставки, рекламні статті, Youtube-канал.	Доступність та об'єктивність інформації про фірму та товар. Послідовність у реалізації обраної позиції. Планомірність і послідовність при прийнятті рішень.	Інформаційне завдання про новий товар, та формування знань про марку та виробника	Контролювати процес обробки деталей просто!

Концепція маркетингових комунікацій є, мабуть, однією з найважливіших складових маркетингової програми. Цільові клієнти будуть отримувати інструкції та рекламу в основному через інтернет, підтримкою та виходом на ринок як бренд, також будуть проводитись виставки та публікування в каталогах інструментів та приладів для ЧПК. Головною концепцією рекламного звернення та лозунгом компанії буде вислів «Контролювати процес обробки деталей просто!».

Висновки до розділу

1. Узагальнюючи проведені підрахунки, описи та визначення ринкових стратегій проекту можна зробити висновок про те, що можливість ринкової комерціалізації проекту є на досить хорошому рівні і з вибором правильних підходів та опором на гнучке мислення і не слідуванні чіткому плану проект є доцільним та прибутковим. Прогнозується не погана рентабельність роботи на ринку, навіть якщо ринок буде дуже динамічним та

гнучким в майбутньому, через те, що на даний товар є попит і цей попит все ж таки на не поганому рівні.

2. Основним бар'єром входження на ринок є великі компанії, які створюють велику конкуренцію, але це не може не приваблювати, бо якщо є велика конкуренція є досить великий попит, звідси можна зрозуміти, що ринок достатньо прибутковий і перспективний в майбутньому, так як проект є досить конкурентоспроможним. Маючи гарні тактичні навички та хист до приладобудування, проект повинен принести не поганий прибуток в майбутньому і, можливо, змінити ставлення до цієї недооціненої, на даний час, сфери машино- та приладобудування.

3. Як альтернативу впровадження для ринкової реалізації доцільно обрати модернізацію попередніх версій продукту, так як на мій погляд деякі компанії недооцінюють впровадження цієї технології і пристрою як окремий сегмент контролю процесу різання та підвищення шорсткості за рахунок електрорушійної сили.

4. Імплементація проекту є найважливішим фактором розвитку стартапу або й взагалі виходу на ринок, бо, навіть, дуже хороша ідея не дає такого результату як імплементація. Адже тільки грамотне впровадження, пояснення цілей та користі продукту користувачу та інвесторам може вивести даний продукт на ринок та зарекомендувати себе як компанія з цілями, а з часом як бренд, з всесвітнім визнанням.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проаналізувавши існуючі методи контролю стану різального інструменту можна зробити висновок, що система контролю процесу обробки деталей повинна базуватися на вимірюванні та аналізі двох або більше параметрів процесу різання, а саме потужності різання та змінної складової ЕРС.

2. На основі проведених теоретичних досліджень встановлено взаємозв'язок між станом різального інструменту та змінної складової ЕРС різання та потужністю.

3. Розроблена комплексна математична модель для визначення залежності параметрів зношення різального інструменту від потужності різання та змінної складової ЕРС різання.

4. На базі вдосконалених засобів розроблена двохпараметрична система контролю процесу обробки деталей приладів на верстатах з ЧПК в умовах автоматизованого виробництва при використанні ГВС, що дозволяє контролювати зношення різального інструменту, отриману шорсткість деталі у момент її обробки та поломку різального інструменту.

5. Розроблено стартап-проект та визначено ринкові стратегії проекту. Ринкова комерціалізація проекту є на досить хорошому рівні і з вибором правильних підходів та опором на гнучке мислення і не слідуванні чіткому плану проект є доцільним та прибутковим. Прогнозується не погана рентабельність роботи на ринку, навіть якщо ринок буде дуже динамічним та гнучким в майбутньому, через те, що на даний товар є попит і цей попит все ж таки на не поганому рівні.

Література

1. Остафьев В.А., Тымчик Г.С., Шевченко В.В. Адаптивная система управления. Механизация и автоматизация управления. 1983. №1. С. 18–20.
2. Остафьев В. А. Физические основы процесса резания под редакцией д.т.н. Остафьева В.А. / В. А. Остафьев, В. С. Антонюк, С. П. Вислоух. – Киев: изд. «Вища школа», 1976. – 136-137 с.
3. Шевченко В. В. Діагностика працездатності різального інструменту при чистовому точінні на основі електромагнітних явищ. на здобуття наук. ступеня кандидата технічних наук / Шевченко Вадим Володимирович – К., 1985, с. 37-46.
4. Козочкин М.П. Динамика процесса резания. Теория, эксперименты, анализ / М. П. Козочкин. - LAP, 2013. – 296 с.
5. Ящерицын П.И. Основы резания материалов и режущий инструмент: [Учебник для машиностроит. спец. вузов] / П.И.Ящерицын, М.Л. Еременко, Н.И. Жигалко. – 2-е изд., доп. и перераб. – Мн.: Выш. Школа, 1981.- с. 7-10.
6. Куксенова Л.И. Методы испытания на трения и износ / Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева, А.Г. Колмаков. - М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 152 с.
7. Панов А.А. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин и др. М.: Машиностроение, 2004. – 416 с.
8. Артингер И. Инструментальные стали и их термическая обработка / И. Артингер. - М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
9. Зорев Н. Н. Обработка резанием труднообрабатываемых материалов / Н. Н. Зорев. - Л.: Машиностроение, 1970. - с. 205-215.
10. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах / Б. И. Костецкий. – Киев: Техника, 1970. – 396 с.
11. Фетисов Г.П. Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисов. - М.: Металлургиздат, 2001. – 535 с.

12. Руководство по металлообработке Sandvik Coromant (технический справочник). – SANDVIK Coromant, 2006. – 640 с.
13. Каніси Р. Спосіб визначення зношення різального інструменту [Патент Японія № 1209545, МПК В23 Q 17/00]. Каніси Ретсу, Фуззіцу К. К. Заяв., 1980.
14. Грицай І.Є. Різання металів. Теорія різання / І.Є. Грицай, М.Л. Кукляк. – Львів: Видавництво львівської політехніки, 2005. – 132 с.
15. Колев Н. С. Теоретичні і експериментальні дослідження тертя і зносу вольфрамокарбідних і титановольфрамокарбідних сплавів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня док. техн. наук: спец. РІСХМ / Н. С. Колев. - Ростов-на-Дону, 1973.- 53 с.
16. Коробов Ю. М. Електромеханічний знос при терті і різанні металів / Ю. М. Коробов, Г. А. Прейс. - Київ: Техніка, 1976. – 200 с.
17. Коробов Ю. М. Дослідження електричних явищ при чистовому точінні / Ю. М. Коробов. [Зб. Електричні явища при терті, різанні, змащенні твердих тіл].- М.: Наука, 1973.- с.109-114.
18. Попов В.С. Зносостійкість, сплавів відновлення та зміцнення деталей машин / В.С. Попов. – Запоріжжя: Видавництво ВАТ «Мотор Січ», 2006. – 420 с.
19. Баскаков А. П. Теплотехника / А. П. Баскаков. – [2 изд.]. - М.: Энергоатомиздат, 1991. – с. 77-103.
20. Авечников В. И. Автоматизация выбора режущего инструмента для станков с ЧПУ / В. И. Авечников, А.В. Аверченков, М.В. Тетехов. - М.: ФЛИНТА, 2011 – 151 с.
21. Зайцев С.А. Контрольно-измерительные приборы и инструменты: Учебник / С.А. Зайцев, Д. Д. Грибанов, А. Н. Толстой, Р. В. Меркулов. – М.: Издательский центр “Академия”, 2003. – 464 с.
22. Постніков С. Н. Електричні явища при терті і різанні / С. Н. Постніков. - Горький: Волговят. кн.вид-во, 1985. - 284 с.

23. Остафьев В. О. Система контролю зносу інструменту на основі віброакустичного сигналу / В. О. Остафьев, В. В. Кокаровцев. [Зб. Підвищення ефективності виробництва в машинобудуванні на основі застосування технологічного устаткування з ЧПК] – К.: 1980. - 18 с.
24. Васильев С. В. ЭДС и температура резания // Станки и инструмент. – 1980. – № 10. –С. 20–22.
25. Лоладзе Т. Н. Міцність і зносостійкість ріжучого інструменту / Т. Н. Лоладзе. - М.: Машинобудування, 1982. – 320 с.
26. Лурье Г.Б. Износ режущего инструмента / Г.Б. Лурье. - М.: Высшая школа, 1991. – 354 с.
27. Остафьев В. О. Розрахунок динамічної міцності ріжучого інструменту / В. О. Остафьев. - М.: Машинобудування, 1979. – 168 с.
28. Силін С. С. Встановлення критерійних залежностей при різанні металів на основі вивчення теплових явищ / С. С. Силін, М.:Машинобудування, 1966, с.102-137. – [В кн: Теплові явища і обробка різанням авіаційних матеріалів. Під ред. П.И.Бобриня. Праці МАТІ, Вип.64].
29. Козочкин М. П. Способ определения износа режущего инструмента (RU 2478929) / Козочкин М. П., Григорьев С. Н., Порватов А. Н. - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский Государственный Технологический Университет "СТАНКИН".
30. Кравченко В. Ф. Питання виникнення термо-ЕРС при різанні / В. Ф. Кравченко. Н., 1976. - с. 29-34.
31. Плотников А. Л., Крылов Е. Г. Способ контроля состояния режущих кромок сборных многолезвийных инструментов. [Патент RU 2440031]. - Волгоградский государственный технический университет. – 2006.
32. Шевченко В. В. Діагностика працездатності різального інструменту при чистовому точінні на основі електромагнітних явищ. на здобуття наук. ступеня кандидата технічних наук / Шевченко Вадим Володимирович – К., 1985, с. 37-46.

33. Сарилов М.Ю., Максимов А.Ю. Контрольно-измерительный комплекс для контроля износа режущего инструмента. [Патент RU 2246072]. - Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. – 2001.
34. Залога В. А., Нагорный В. В. Оценка степени сноса инструмента методом виброакустики. [Патент UA 24673].. - Вісник СумДУ. Серія Технічні науки”, №4’ – 2011.
35. Внуков Ю. Н, Дубровин В.И., Афонин Ю.С., Манило Т.В. Моделирование износа инструмента по результатам вейвлет-преобразования звукового сигнала. Статья. - Запорожский национальный технический университет. – 2007.
36. Сероухов П.Ю., Пушков Р.Л. Контроль и прогнозирование износа режущего инструмента при помощи подсистемы диагностики. Статья. – Московский государственный технологический университет. – 2009.
37. Егоров А.В. Способ измерения мощности резания материала [Патент РФ №2460051]. – 2011.
38. Зориктуев В.Ц. Устройство для измерения мощности резания [Патент SU №1282967] / Зориктуев В.Ц., Исаев Ш.Г., Никин А.Д., Миннихметов Р.Н, Антаков В.Б. – Тверской М.М. Автоматическое управление обработки деталей на станках. – М., 1982, с. 141-143.
39. Мартинов Г. Н., Синопальников В. А., Григорьев А. С. Устройство контроля износа и прогнозирования остаточной стойкости режущего инструмента для системы ЧПУ станка. [Патент RU 220574].. - Московский Государственный Технологический Университет. – 2009.
40. Румбешта В.А. Симута Н.А. Способ измерения сил резания при токарной обработке. – Вісник КНУТД №1 – 2012, с. 48-52.
41. Остафьев В.А. Технологические процессы изготовления деталей приборов / В.А. Остафьев, В.А. Румбешта, В.А. Держук – К.: Высшая школа, 1983. – 207с.

42. Аветов А.А., Афанасьев Ф.З., Бобровский В.А. О влиянии термоотоков, возникающих при резани металлов, на шероховатость обработанной поверхности // Вестник машиностроения, №3, 1973. – с. 4-7.

43. Румбешта В.А. Гибкие производственные системы. Методические указания к изучению курсов «Интегрированные системы оптического производства» и «Автоматика и автоматические линии» / В.А. Румбешта, И.В. Максимчук. - Киев, КПИ, «Укрвузполиграф», 1990. – 48с.

44. Назаренко П.В. Расчет силы и коэффициента трения кристаллических тел на основе дислокационной модели внешнего трения // Проблемы трения и изнашивания, №3, - К.: Техника, 1973. – с. 72-74.

45. Подураев В.Н. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии / В.Н. Подураев, А.А. Барзов, В.А. Горелов. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.

46. Барзов А.А. Пути повышения эффективности эксплуатации режущего инструмента с многогранными пластинами / А.А. Барзов, И.А. Тутнов, А.Ю. Кулагин и др. – М.: НИИмаш, 1980 – 52 с.

47. Матвиенко А.В. К вопросу о влиянии ЭДС резания на шероховатость обработанной поверхности // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Матвиенко А.В., Феник Л.Н. - Донецк: ДонНТУ, 2006. - Вып. 32. - С.74-77.

48. Ивченко Т.Г. Исследование гармонического состава ЭДС резания в зависимости от износа режущего инструмента // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Т.Г. Ивченко, М.А. Смирнова, А.В. Матвиенко – Донецк: ДонНТУ, 2008. – Вып. 16. С 154-160.

49. Добрышин С.А. Методы автоматизированного исследования вибраций машин. Справочник / С.А. Добрышин, М.С. Фельдман. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.

50. Смирнова М.А. Определение гармонического состава токов и напряжений при измерении сил резания в механообработке // Наукові праці

Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 4 (124) - Донецьк, ДонНТУ, 2007.- С.49-55.

51. Смирнова М.А. Методика определения гармонического состава и симметричных составляющих токов и напряжений в переходных режимах электромеханических систем // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы. - Донецк: ДонНТУ. Том 3. 2007. – С.320 - 329.

52. Лавріненко В. І., Девіцький О. А., Ситник Б. В. Електричні явища в процесах механічної обробки, їх взаємозв'язок з продуктивністю та енергоємністю оброблювання та способи ефективного застосування цих явищ // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк: ДНТУ, 2009. – Вип. 38. – С. 122–126.

53. Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 1. /Под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. – 7-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.

54. Абзаев Р.И. Комплексная компьютерная диагностика процесса резания деталей ГТД на станках с ЧПУ по физическим параметрам в зоне резания. С.79-84.

55. Румбешта В.А. Гибкие производственные системы. Методические указания к изучению курсов «Интегрированные системы оптического производства» и «Автоматика и автоматизация производства» / В.А. Румбешта, И.В. Максимчук.- Киев, КПИ, "Укрвузполиграф", 1990. - 48с.

56. Деревянченко А.Г., Павелко В.Д., Андреев А.В. Диагностирование состояния режущих инструментов при прецизионной обработке. Одесса: Аспропринт. 1999. 195-196 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ДОДАТОК Б

**Код прототипу програмного забезпечення для контролю обробки
деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва, розробленого
на мові програмування C++ в інтегрованому середовищі розробки
Eclipse CDT (C/C++ Development Tooling).**

```
#pragma once
#include "math.h"

namespace Project1 {

    using namespace System;
    using namespace System::ComponentModel;
    using namespace System::Collections;
    using namespace System::Windows::Forms;
    using namespace System::Data;
    using namespace System::Drawing;

    /// <summary>
    /// Сводка для MyForm3
    /// </summary>
    public ref class MyForm3 : public System::Windows::Forms::Form
    {
    public:
        MyForm3(void)
        {
            InitializeComponent();
            //
            //TODO: добавьте код конструктора
            //
        }

    protected:
        /// <summary>
        /// Освободить все используемые ресурсы.
        /// </summary>
        ~MyForm3()
        {
            if (components)
            {
                delete components;
            }
        }

    private: System::Windows::Forms::Label^ label1;
    protected:
    private: System::Windows::Forms::TextBox^ textBox_tt;
    private: System::Windows::Forms::TextBox^ textBox_vv;
    private: System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Chart^ chart2;
    private: System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Chart^ chart3;
    private: System::Windows::Forms::Label^ label11;
    private: System::Windows::Forms::Label^ label2;
    private: System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Chart^ chart1;
    private: System::Windows::Forms::Label^ label3;
    private: System::Windows::Forms::Button^ button6;
    private: System::Windows::Forms::Label^ label6;
    private: System::Windows::Forms::Label^ label7;
    private: System::Windows::Forms::Label^ label4;
    private: System::Windows::Forms::Label^ label5;
    private: System::Windows::Forms::Label^ label8;
    private: System::Windows::Forms::Label^ label9;
```

```

private: System::Windows::Forms::MenuStrip^ menuStrip1;
private: System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem^ файлToolStripMenuItem;
private: System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem^ змінитиToolStripMenuItem;
private: System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem^ сервісToolStripMenuItem;
private: System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem^ проАвтораToolStripMenuItem;
private: System::Windows::Forms::TextBox^ textBox1;
private: System::Windows::Forms::TextBox^ textBox2;
private: System::Windows::Forms::ComboBox^ comboBox1;
private: System::Windows::Forms::ComboBox^ comboBox2;
private: System::Windows::Forms::Button^ button1;
private: System::Windows::Forms::Button^ button4;
private: System::Windows::Forms::Button^ button2;
private: System::Windows::Forms::Button^ button3;
private:
    /// <summary>
    /// Обязательная переменная конструктора.
    /// </summary>
    System::ComponentModel::Container ^components;

```

```

#pragma region Windows Form Designer generated code

```

```

    /// <summary>
    /// Требуемый метод для поддержки конструктора — не изменяйте
    /// содержимое этого метода с помощью редактора кода.
    /// </summary>
    void InitializeComponent(void)
    {
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::ChartArea^ chartArea4 =
        (gcnew System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::ChartArea());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Legend^ legend4 = (gcnew
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Legend());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Series^ series4 = (gcnew
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Series());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::ChartArea^ chartArea5 =
        (gcnew System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::ChartArea());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Legend^ legend5 = (gcnew
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Legend());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Series^ series5 = (gcnew
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Series());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::ChartArea^ chartArea6 =
        (gcnew System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::ChartArea());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Legend^ legend6 = (gcnew
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Legend());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Series^ series6 = (gcnew
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Series());
        this->label1 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->textBox_tt = (gcnew System::Windows::Forms::TextBox());
        this->textBox_vv = (gcnew System::Windows::Forms::TextBox());
        this->chart2 = (gcnew System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Chart());
        this->chart3 = (gcnew System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Chart());
        this->label11 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->label2 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->chart1 = (gcnew System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Chart());
        this->label3 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->button6 = (gcnew System::Windows::Forms::Button());
        this->label6 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->label7 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->label4 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->label5 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->label8 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->label9 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
    }

```

```

        this->menuStrip1 = (gcnew System::Windows::Forms::MenuStrip());
        this->файлToolStripMenuItem = (gcnew
System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem());
        this->змінитиToolStripMenuItem = (gcnew
System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem());
        this->сервісToolStripMenuItem = (gcnew
System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem());
        this->проАвтораToolStripMenuItem = (gcnew
System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem());
        this->textBox1 = (gcnew System::Windows::Forms::TextBox());
        this->textBox2 = (gcnew System::Windows::Forms::TextBox());
        this->comboBox1 = (gcnew System::Windows::Forms::ComboBox());
        this->comboBox2 = (gcnew System::Windows::Forms::ComboBox());
        this->button1 = (gcnew System::Windows::Forms::Button());
        this->button4 = (gcnew System::Windows::Forms::Button());
        this->button2 = (gcnew System::Windows::Forms::Button());
        this->button3 = (gcnew System::Windows::Forms::Button());
        (cli::safe_cast<System::ComponentModel::ISupportInitialize^>(this->chart2))-
>BeginInit();
        (cli::safe_cast<System::ComponentModel::ISupportInitialize^>(this->chart3))-
>BeginInit();
        (cli::safe_cast<System::ComponentModel::ISupportInitialize^>(this->chart1))-
>BeginInit();

        this->menuStrip1->SuspendLayout();
        this->SuspendLayout();
        //
        // label1
        //
        this->label1->AutoSize = true;
        this->label1->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 14,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
        static_cast<System::Byte>(204)));
        this->label1->Location = System::Drawing::Point(12, 22);
        this->label1->Name = L"label1";
        this->label1->Size = System::Drawing::Size(309, 22);
        this->label1->TabIndex = 0;
        this->label1->Text = L"Змінна складова EPC різака LIVE";
        //
        // textBox_tt
        //
        this->textBox_tt->Location = System::Drawing::Point(646, 58);
        this->textBox_tt->Name = L"textBox_tt";
        this->textBox_tt->Size = System::Drawing::Size(121, 20);
        this->textBox_tt->TabIndex = 16;
        //
        // textBox_vv
        //
        this->textBox_vv->Location = System::Drawing::Point(646, 86);
        this->textBox_vv->Name = L"textBox_vv";
        this->textBox_vv->Size = System::Drawing::Size(121, 20);
        this->textBox_vv->TabIndex = 17;
        //
        // chart2
        //
        chartArea4->Name = L"ChartArea1";
        this->chart2->ChartAreas->Add(chartArea4);
        legend4->Name = L"Legend1";
        this->chart2->Legends->Add(legend4);
        this->chart2->Location = System::Drawing::Point(16, 43);
        this->chart2->Name = L"chart2";
        series4->ChartArea = L"ChartArea1";
        series4->ChartType =
System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::SeriesChartType::Line;

```

```

series4->Legend = L"Legend1";
series4->Name = L"Series1";
this->chart2->Series->Add(series4);
this->chart2->Size = System::Drawing::Size(389, 198);
this->chart2->TabIndex = 20;
this->chart2->Text = L"chart2";
//
// chart3
//
chartArea5->Name = L"ChartArea1";
this->chart3->ChartAreas->Add(chartArea5);
legend5->Name = L"Legend1";
this->chart3->Legends->Add(legend5);
this->chart3->Location = System::Drawing::Point(16, 279);
this->chart3->Name = L"chart3";
series5->ChartArea = L"ChartArea1";
series5->ChartType
System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::SeriesChartType::Line;
series5->Legend = L"Legend1";
series5->Name = L"Series1";
this->chart3->Series->Add(series5);
this->chart3->Size = System::Drawing::Size(389, 198);
this->chart3->TabIndex = 22;
this->chart3->Text = L"chart3";
//
// label11
//
this->label11->AutoSize = true;
this->label11->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 14,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->label11->Location = System::Drawing::Point(12, 258);
this->label11->Name = L"label11";
this->label11->Size = System::Drawing::Size(218, 22);
this->label11->TabIndex = 21;
this->label11->Text = L"Потужність різака LIVE";
//
// label2
//
this->label2->AutoSize = true;
this->label2->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 14,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->label2->Location = System::Drawing::Point(468, 22);
this->label2->Name = L"label2";
this->label2->Size = System::Drawing::Size(275, 22);
this->label2->TabIndex = 25;
this->label2->Text = L"Початкові параметри обробки";
//
// chart1
//
chartArea6->Name = L"ChartArea1";
this->chart1->ChartAreas->Add(chartArea6);
legend6->Name = L"Legend1";
this->chart1->Legends->Add(legend6);
this->chart1->Location = System::Drawing::Point(472, 279);
this->chart1->Name = L"chart1";
series6->ChartArea = L"ChartArea1";
series6->ChartType
System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::SeriesChartType::Spline;
series6->Legend = L"Legend1";
series6->Name = L"Series1";
this->chart1->Series->Add(series6);

```

```

this->chart1->Size = System::Drawing::Size(389, 198);
this->chart1->TabIndex = 27;
this->chart1->Text = L"chart1";
//
// label3
//
this->label3->AutoSize = true;
this->label3->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 14,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->label3->Location = System::Drawing::Point(468, 258);
this->label3->Name = L"label3";
this->label3->Size = System::Drawing::Size(368, 22);
this->label3->TabIndex = 26;
this->label3->Text = L"Графік зношення різального інструменту";
//
// button6
//
this->button6->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 13,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->button6->Location = System::Drawing::Point(720, 509);
this->button6->Name = L"button6";
this->button6->Size = System::Drawing::Size(141, 39);
this->button6->TabIndex = 31;
this->button6->Text = L"Роздрукувати";
this->button6->UseVisualStyleBackColor = true;
//
// label6
//
this->label6->AutoSize = true;
this->label6->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 12,
System::Drawing::FontStyle::Regular, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->label6->Location = System::Drawing::Point(468, 114);
this->label6->Name = L"label6";
this->label6->Size = System::Drawing::Size(104, 19);
this->label6->TabIndex = 35;
this->label6->Text = L"Коефіцієнт kw";
//
// label7
//
this->label7->AutoSize = true;
this->label7->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 12,
System::Drawing::FontStyle::Regular, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->label7->Location = System::Drawing::Point(468, 142);
this->label7->Name = L"label7";
this->label7->Size = System::Drawing::Size(155, 19);
this->label7->TabIndex = 36;
this->label7->Text = L"Матеріал інструменту";
//
// label4
//
this->label4->AutoSize = true;
this->label4->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 12,
System::Drawing::FontStyle::Regular, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->label4->Location = System::Drawing::Point(468, 85);
this->label4->Name = L"label4";
this->label4->Size = System::Drawing::Size(105, 19);
this->label4->TabIndex = 38;
this->label4->Text = L"Подача, мм/об";

```

```

//
// label5
//
this->label5->AutoSize = true;
this->label5->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 12,
System::Drawing::FontStyle::Regular, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->label5->Location = System::Drawing::Point(468, 57);
this->label5->Name = L"label5";
this->label5->Size = System::Drawing::Size(148, 19);
this->label5->TabIndex = 37;
this->label5->Text = L"Глибина різання, мм";
//
// label8
//
this->label8->AutoSize = true;
this->label8->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 12,
System::Drawing::FontStyle::Regular, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->label8->Location = System::Drawing::Point(468, 200);
this->label8->Name = L"label8";
this->label8->Size = System::Drawing::Size(111, 19);
this->label8->TabIndex = 42;
this->label8->Text = L"Оброб. діаметр";
//
// label9
//
this->label9->AutoSize = true;
this->label9->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 12,
System::Drawing::FontStyle::Regular, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->label9->Location = System::Drawing::Point(468, 172);
this->label9->Name = L"label9";
this->label9->Size = System::Drawing::Size(118, 19);
this->label9->TabIndex = 41;
this->label9->Text = L"Оброб. матеріал";
//
// menuStrip1
//
this->menuStrip1->Items->AddRange(gcnew cli::array<
System::Windows::Forms::ToolStripItem^ >(4) {
    this->файлToolStripMenuItem,
    this->змінитиToolStripMenuItem,
    >сервісToolStripMenuItem, this->проАвтораToolStripMenuItem
    this->файлToolStripMenuItem,
    this->змінитиToolStripMenuItem,
    >сервісToolStripMenuItem, this->проАвтораToolStripMenuItem
});
this->menuStrip1->Location = System::Drawing::Point(0, 0);
this->menuStrip1->Name = L"menuStrip1";
this->menuStrip1->Size = System::Drawing::Size(888, 24);
this->menuStrip1->TabIndex = 43;
this->menuStrip1->Text = L"menuStrip1";
//
// файлToolStripMenuItem
//
this->файлToolStripMenuItem->Name = L"файлToolStripMenuItem";
this->файлToolStripMenuItem->Size = System::Drawing::Size(48, 20);
this->файлToolStripMenuItem->Text = L"Файл";
//
// змінитиToolStripMenuItem
//
this->змінитиToolStripMenuItem->Name = L"змінитиToolStripMenuItem";
this->змінитиToolStripMenuItem->Size = System::Drawing::Size(64, 20);
this->змінитиToolStripMenuItem->Text = L"Змінити";
//

```

```

// cepvicToolStripMenuItem
//
this->cepvicToolStripMenuItem->Name = L"cepvicToolStripMenuItem";
this->cepvicToolStripMenuItem->Size = System::Drawing::Size(55, 20);
this->cepvicToolStripMenuItem->Text = L"Сєвєє";
//
// проАвтораToolStripMenuItem
//
this->проАвтораToolStripMenuItem->Name = L"проАвтораToolStripMenuItem";
this->проАвтораToolStripMenuItem->Size = System::Drawing::Size(82, 20);
this->проАвтораToolStripMenuItem->Text = L"Автор Коробцов Є.І. студент
групи ПБ-61м. Дата створення 10.05.2018. Контакти: +380976929683
evheniykorobtsov@gmail.com";
//
// textBox1
//
this->textBox1->Location = System::Drawing::Point(646, 115);
this->textBox1->Name = L"textBox1";
this->textBox1->Size = System::Drawing::Size(121, 20);
this->textBox1->TabIndex = 44;
//
// textBox2
//
this->textBox2->Location = System::Drawing::Point(646, 201);
this->textBox2->Name = L"textBox2";
this->textBox2->Size = System::Drawing::Size(121, 20);
this->textBox2->TabIndex = 45;
//
// comboBox1
//
this->comboBox1->FormattingEnabled = true;
this->comboBox1->Location = System::Drawing::Point(646, 143);
this->comboBox1->Name = L"comboBox1";
this->comboBox1->Size = System::Drawing::Size(121, 21);
this->comboBox1->TabIndex = 46;
//
// comboBox2
//
this->comboBox2->FormattingEnabled = true;
this->comboBox2->Location = System::Drawing::Point(646, 173);
this->comboBox2->Name = L"comboBox2";
this->comboBox2->Size = System::Drawing::Size(121, 21);
this->comboBox2->TabIndex = 47;
//
// button1
//
this->button1->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 13,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->button1->Location = System::Drawing::Point(578, 509);
this->button1->Name = L"button1";
this->button1->Size = System::Drawing::Size(141, 39);
this->button1->TabIndex = 48;
this->button1->Text = L"Зберєти";
this->button1->UseVisualStyleBackColor = true;
//
// button4
//
this->button4->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 13,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->button4->Location = System::Drawing::Point(436, 509);
this->button4->Name = L"button4";

```



```

this->button4->Size = System::Drawing::Size(141, 39);
this->button4->TabIndex = 49;
this->button4->Text = L"Побудувати";
this->button4->UseVisualStyleBackColor = true;
//
// button2
//
this->button2->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 13,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->button2->Location = System::Drawing::Point(114, 509);
this->button2->Name = L"button2";
this->button2->Size = System::Drawing::Size(141, 39);
this->button2->TabIndex = 51;
this->button2->Text = L"Побудувати";
this->button2->UseVisualStyleBackColor = true;
//
// button3
//
this->button3->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 13,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->button3->Location = System::Drawing::Point(261, 509);
this->button3->Name = L"button3";
this->button3->Size = System::Drawing::Size(141, 39);
this->button3->TabIndex = 50;
this->button3->Text = L"Роздрукувати";
this->button3->UseVisualStyleBackColor = true;
//
// MyForm3
//
this->AutoScaleDimensions = System::Drawing::SizeF(6, 13);
this->AutoScaleMode = System::Windows::Forms::AutoScaleMode::Font;
this->ClientSize = System::Drawing::Size(888, 565);
this->Controls->Add(this->button2);
this->Controls->Add(this->button3);
this->Controls->Add(this->button4);
this->Controls->Add(this->button1);
this->Controls->Add(this->comboBox2);
this->Controls->Add(this->comboBox1);
this->Controls->Add(this->textBox2);
this->Controls->Add(this->textBox1);
this->Controls->Add(this->label8);
this->Controls->Add(this->label9);
this->Controls->Add(this->label4);
this->Controls->Add(this->label5);
this->Controls->Add(this->label7);
this->Controls->Add(this->label6);
this->Controls->Add(this->button6);
this->Controls->Add(this->chart1);
this->Controls->Add(this->label3);
this->Controls->Add(this->label2);
this->Controls->Add(this->chart3);
this->Controls->Add(this->label11);
this->Controls->Add(this->chart2);
this->Controls->Add(this->textBox_vv);
this->Controls->Add(this->textBox_tt);
this->Controls->Add(this->label1);
this->Controls->Add(this->menuStrip1);
this->MainMenuStrip = this->menuStrip1;
this->Name = L"MyForm3";
this->Text = L"Korobtsov Graphics v1.1";

```

```

        (cli::safe_cast<System::ComponentModel::ISupportInitialize^>(this->chart2))-
>EndInit();
        (cli::safe_cast<System::ComponentModel::ISupportInitialize^>(this->chart3))-
>EndInit();
        (cli::safe_cast<System::ComponentModel::ISupportInitialize^>(this->chart1))-
>EndInit();

        this->menuStrip1->ResumeLayout(false);
        this->menuStrip1->PerformLayout();
        this->ResumeLayout(false);
        this->PerformLayout();
    }
#pragma endregion

double h(double dh, double k_w, double j, double u, double s,
double v, double k_4, double k_rf, double k_kf,
double p_c, double d, double nu, double t_0) {
    return dh * k_w * j * u * s * v * k_4 * k_rf * k_kf * exp(-d / nu / t_0) / p_c / 60000;
}

array<double>^ kk) {
    array<array<double>^>^> rng(double x0, double x1, double step, array<double>^ y0,

        int n = (int)((x1 - x0) / step);
        if (n < 1)
            n = 1;
        double h = (x1 - x0) / n;
        array<array<double>^>^> ans = gcnew array<array<double>^>(n + 1);
        ans[0] = gcnew array<double>(4);
        ans[0][0] = x0;
        array<double>^ yk = gcnew array<double>(3);
        for (int i = 1; i < 4; i++) {
            ans[0][i] = y0[i - 1];
            yk[i - 1] = y0[i - 1];
        }
        array<double>^ k1 = gcnew array<double>(3);
        array<double>^ k2 = gcnew array<double>(3);
        array<double>^ k3 = gcnew array<double>(3);
        array<double>^ k4 = gcnew array<double>(3);
        for (int i = 1; i < n + 1; i++)
        {
            ans[i] = gcnew array<double>(4);
            ans[i][0] = x0 + i * h; //Current x
            k1 = df_RIC(ans[i][0], yk, h, kk, y0);
            for (int j = 0; j < 3; j++)
                yk[j] = yk[j] + k1[j] / 2;
            k2 = df_RIC(ans[i][0] + h / 2, yk, h, kk, y0);
            for (int j = 0; j < 3; j++)
                yk[j] = yk[j] + k2[j] / 2;
            k3 = df_RIC(ans[i][0] + h / 2, yk, h, kk, y0);
            for (int j = 0; j < 3; j++)
                yk[j] = yk[j] + k3[j];
            k4 = df_RIC(ans[i][0] + h, yk, h, kk, y0);
            for (int j = 0; j < 3; j++)
                yk[j] = yk[j] + (k1[j] + 2 * k2[j] + 2 * k3[j] + k4[j]) / 6;

            for (int j = 1; j < 4; j++)
                ans[i][j] = yk[j - 1];
        }
        return ans;
    }
    array<double>^ df_RIC(double x, array<double>^ y, double h, array<double>^ k,
array<double>^ ci) {
        array<double>^ ans = gcnew array<double>(3);

```

```

        double t = 4;
        ans[0] = h * (1 / t * (ci[0] - y[0]) - k[0] * y[0] + k[3] * y[1]);
        ans[1] = h * (1 / t * (ci[1] - y[1]) + k[0] * y[0] - k[1] * y[1] + k[2] * y[2] - k[3] *
y[1]);

        ans[2] = h * (1 / t * (ci[2] - y[2]) + k[1] * y[1] - k[2] * y[2]);
        return ans;
    }

private: System::Void button2_Click(System::Object^ sender, System::EventArgs^ e) {
}
};
}

```

ДОДАТОК В